le Scienze

Agosto 2019
euro 4,90

edizione italiana di Scientific American

Mediterraneo tropicale

Il riscaldamento globale favorisce l'arrivo di specie aliene, alterando habitat e biodiversità dei nostri mari

Intelligenza artificiale
Possiamo insegnare alle macchine a essere creative?

Fisica
Il mistero della massa di protoni e neutroni

Neuroscienze
I meccanismi cerebrali dei comportamenti violenti

in copertina

Sommario

Invasioni di specie aliene, distruzione di habitat, aumento dell'acidità e riscaldamento delle acque sono effetti sperimentati dal Mediterraneo a causa del cambiamento climatico (*Robert Palomba/Onlyfrance/SIME*)

agosto 2019 numero 612

68

Henning Dalhoff/AGF

12

17

91

SCIENZA NEWS

Cortesia Biofuture Medicine (*in alto*); cortesia NASA/JHU-APL (*al centro*); dardespot/iStock (*in basso*)

Le Scienze S.p.A.

Via Cristoforo Colombo, 90 - 00147 Roma
Codice fiscale, Iscrizione presso il Registro delle Imprese e Partita Iva n. 00882050156
Bilancio al 31 dicembre 2018
(pubblicato a norma dell'art. 1, comma 33, del D.L. 23 ottobre 1996 n. 545 convertito con legge 23 dicembre 1996 n. 650)

Stato Patrimoniale

euro

ATTIVO		31-12-2017	31-12-2018
A -	**Crediti verso soci per versamenti ancora dovuti**	-	-
B -	**Immobilizzazioni**		
I.	*Immobilizzazioni immateriali*		
	Concessioni, licenze, marchi e diritti simili	-	-
	TOTALE IMMOBILIZZAZIONI IMMATERIALI	-	-
II.	*Immobilizzazioni materiali*		
	Impianti e macchinari	-	-
	Mobili, dotazioni e automezzi	-	-
	Altri beni	-	-
	TOTALE IMMOBILIZZAZIONI MATERIALI	0	0
III.	*Immobilizzazioni finanziarie*		
	Partecipazioni in		
	- altre imprese	665	665
	Crediti		
	- verso altri	5.100	5.100
	TOTALE IMMOBILIZZAZIONI FINANZIARIE	5.765	5.765
	TOTALE IMMOBILIZZAZIONI	**5.765**	**5.765**
C -	**Attivo circolante**		
I.	*Rimanenze*		
	Materie prime, sussidiarie, di consumo	33.403	71.350
	Prodotti finiti e merci	59.470	58.636
	TOTALE RIMANENZE	**92.873**	**129.986**
II.	*Crediti*		
	Verso clienti	45.001	75.745
	Crediti verso imprese correlate	814.888	926.804
	Crediti tributari	385.407	465.879
	Imposte anticipate	42.749	42.364
	Verso altri	32.856	29.875
	TOTALE CREDITI	**1.320.902**	**1.540.666**
IV.	*Disponibilità liquide*		
	Depositi bancari e postali	1.820.289	527.829
	Denaro e valori in cassa	127	127
	TOTALE DISPONIBILITA' LIQUIDE	1.820.416	527.956
	TOTALE ATTIVO CIRCOLANTE	**3.234.191**	**2.198.608**
D -	**Ratei e risconti**		
	Altri ratei e risconti attivi	55.606	54.826
	TOTALE RATEI E RISCONTI	**55.606**	**54.826**
	TOTALE ATTIVO	**3.295.562**	**2.259.200**

euro

PASSIVO		31-12-2017	31-12-2018
A -	**Patrimonio netto**		
I.	*Capitale*	103.400	103.400
II.	*Riserva sovrapprezzo azioni*	-	-
III.	*Riserve di rivalutazione*	-	-
IV.	*Riserva legale*	20.680	20.680
V.	*Riserve statutarie*	-	-
VI.	*Riserva per azioni proprie in portafoglio*	-	-
VII.	*Altre riserve*	-	-
VIII.	*Utili (perdite) portati a nuovo*	51.794	52.798
IX.	*Utile (perdita) dell'esercizio*	39.262	8.291
	PATRIMONIO NETTO	**215.136**	**185.169**
B -	**Fondi per rischi ed oneri**		
	Fondi per trattamento di quiescenza ed obblighi simili	4.204	4.204
	TOTALE FONDI PER RISCHI ED ONERI	**4.204**	**4.204**
C -	**Trattamento di fine rapporto di lavoro subordinato**	**126.211**	**133.625**
D -	**Debiti**		
	Debiti verso fornitori	227.206	278.293
	Debiti verso imprese correlate	1.454.131	409.175
	Debiti tributari	26.909	33.890
	Debiti verso istituti di previdenza		
	e di sicurezza sociale	65.178	64.766
	Altri debiti	114.486	97.402
	TOTALE DEBITI	**1.887.910**	**883.524**
E -	**Ratei e risconti**	**1.062.101**	**1.052.678**
	TOTALE PASSIVO	**3.295.562**	**2.259.200**

Conto Economico

euro

		2017	2018
A-	**Valore della produzione**		
	Ricavi delle vendite e delle prestazioni	3.022.781	3.117.949
	Variazione delle rimanenze di prodotti in corso di lavorazione,		
	semilavorati e finiti	6.296	(834)
	Altri ricavi e proventi	105.399	59.063
	TOTALE VALORE DELLA PRODUZIONE	**3.134.476**	**3.176.178**
B-	**Costi della produzione**		
	Per materie prime, sussidiarie, di consumo e di merci	296.507	369.093
	Per servizi	1.798.128	1.773.598
	Per godimento di beni di terzi	287.203	303.887
	Per il personale:		
	- Salari e stipendi	440.785	475.921
	- Oneri sociali	137.050	148.790
	- Trattamento di fine rapporto	34.813	38.554
	- Trattamento di quiescenza e simili	-	-
	- Altri costi	10.405	9.952
	Ammortamenti e svalutazioni:		
	- Ammortamenti delle immobilizzazioni immateriali	-	-
	- Ammortamenti delle immobilizzazioni materiali	-	-
	Variazione delle rimanenze di materie		
	prime, sussidiarie, di consumo e merci	4.433	(37.947)

euro

		2017	2018
	Oneri diversi di gestione	34.303	39.217
	TOTALE COSTI DELLA PRODUZIONE	**3.043.627**	**3.121.064**
	DIFFERENZA TRA VALORE E COSTI DELLA PRODUZIONE	**90.849**	**55.114**
C-	**Proventi ed oneri finanziari**		
	Altri proventi finanziari		
	- Da terzi	187	1.139
	Utile su cambi	-	-
	Altri oneri finanziari		
	- Verso terzi	(5.505)	(5.558)
	Perdite su cambi	(5)	(10)
	TOTALE PROVENTI ED ONERI FINANZIARI	**(5.323)**	**(4.430)**
D-	**Rettifiche di valore di attività finanziarie**	**-**	**-**
	TOTALE DELLE RETTIFICHE	**-**	**-**
	Risultato prima delle imposte	**85.526**	**50.684**
	Imposte sul reddito dell'esercizio, correnti, differite e anticipate:		
	- Imposte correnti	(27.508)	(42.009)
	- Imposte anticipate (differite)	(18.755)	(385)
	Totale imposte	**(46.264)**	**(42.394)**
	UTILE (PERDITA) DELL'ESERCIZIO	**39.262**	**8.291**

Prospetto di dettaglio delle voci del bilancio di esercizio al 31 dicembre 2018
(pubblicato a norma dell'art. 1, comma 33, del D.L. 23 ottobre 1996 n. 545 convertito con legge 23 dicembre 1996 n. 650)

01	Vendita di copie	**2.900.087**
02	Pubblicità	**93.362**
05	Ricavi da editoria on line	**122.165**
06	- Abbonamenti	71.200
07	- Pubblicità	50.965
09	Ricavi da altra attività editoriale	**2.335**
	Totale voci 01+02+05+09	**3.117.949**

di Marco Cattaneo

Editoriale

Che cosa succede nella matematica italiana?

I migliori matematici del nostro paese sono rimasti fuori dai finanziamenti dei PRIN

Ve lo ricordate Alessio Figalli? Ma sì, dai, appena l'anno scorso è stato uno dei premiati con la medaglia Fields, «il Nobel per la matematica», come si sono precipitati a specificare tanti giornali che hanno approfittato dell'occasione per celebrare l'eccellenza della scienza italiana. Ecco, lui.

Guido De Philippis – non ancora 35 anni, ordinario di analisi matematica alla Scuola internazionale superiore di studi avanzati (SISSA) di Trieste – è il coautore di molti dei principali lavori di Figalli. E ha vinto premi di rilievo internazionale. Ultimo, nel 2018, la Stampacchia Medal, assegnata dall'Unione matematica italiana. Un fuoriclasse, insomma. Eppure non è riuscito a vedersi finanziato il progetto che aveva presentato per la linea giovani dei PRIN, i Progetti di rilevante interesse nazionale banditi nel 2017 e assegnati alla fine dello scorso anno. Ora De Philippis andrà al Courant Institute dell'Università di New York, anche se questa scelta non ha alcuna relazione con la bocciatura ai PRIN.

Come lui, d'altra parte, si sono visti bocciare il progetto molti dei più autorevoli matematici italiani. Tutta gente di fama mondiale, che però non merita fondi di ricerca in patria. C'è Enrico Valdinoci, professore all'Università di Milano e alla University of Western Australia, uno che ha avuto un ERC Grant, ha un H-index pari a 29 (Scopus) e nel suo anno di dottorato, secondo i dati della American Mathematical Society, è stato il matematico più citato al mondo. Stessa cosa per Giuseppe Mingione, ERC Grant, premio Caccioppoli, Stampacchia Medal, H-index 43 (Scopus), uno dei matematici italiani più citati di sempre. I loro progetti non hanno nemmeno raggiunto la sufficienza. Come loro Roberto Longo, dell'Università di Roma Tor Vergata, che è riuscito ad aggiudicarsi nientemeno che due ERC Grant ma ha fallito ai PRIN. E Andrei Agrachev, della SISSA di Trieste, che trent'anni fa aveva avuto il prestigiosissimo premio per la matematica dell'Accademia delle scienze sovietica.

Potrei andare avanti con l'elenco, ma ormai si è capito. Il gotha della matematica italiana è rimasto fuori dai PRIN. Peggio, nella prevalutazione che tiene conto della produzione scientifica e del curriculum, molti candidati di altissimo profilo si sono ritrovati appaiati o addirittura più indietro rispetto ad altri sicuramente validi ma con titoli nemmeno confrontabili. Come è possibile? Facile, è sufficiente che non siano trasparenti i criteri con cui vengono assegnati i punteggi. Così tutti i valori di partenza si appiattiscono, e a contare per l'assegnazione dei fondi è soprattutto la valutazione del progetto, che dipende dai *referee* e da giudizi più soggettivi.

Una lettera firmata da un nutrito gruppo di matematici e pubblicata sul Notiziario dell'Unione matematica italiana nelle scorse settimane esprimeva «forti critiche sulla graduatoria dei progetti PRIN di matematica», sottolineando: «In troppi casi questi sconcertanti risultati non rispecchiano l'importanza che i vari gruppi di ricerca hanno nel panorama scientifico internazionale». Un'altra lettera, rivolta ai dirigenti del MIUR dall'Associazione italiana di ricerca operativa, sollecitava a una più corretta valutazione dei profili. (Le trovate entrambe su www.roars.it).

E questo, ahimè, è solo un assaggio. Ne riparleremo dopo le ferie, delle strane coincidenze della matematica italiana. Intanto, buone vacanze a tutti.

A settembre *La fisica nelle cose di ogni giorno*, un libro di James Kakalios sulle leggi fisiche che ci accompagnano nella nostra vita quotidiana

La fisica di tutti i giorni

Immersi come siamo nelle tecnologie di uso quotidiano perdiamo di vista la meraviglia del loro funzionamento, ammesso di saperne qualcosa sui principi scientifici che ne sono alla base. C'è tanta di quella fisica nelle nostre vite di tutti i giorni, che probabilmente anche il più pervicace disinteressato alla scienza ne resterebbe affascinato, se solo ne fosse al corrente.

Prendiamo un tostapane e uno *smartphone*, due degli oggetti che spesso ci capitano tra le mani poco dopo la sveglia del mattino. Sono un concentrato di leggi fisiche che a metterle in ordine cronologico secondo i rispettivi periodi in cui vennero elaborate per la prima volta coprirebbero secoli di storia. Probabilmente la stragrande maggioranza di noi ha studiato buona parte di queste leggi, se non tutte, negli anni di scuola; poi magari le ha riposte nel cassetto delle nozioni noiose, o quantomeno inutili dal punto di vista pratico. Ma si sbagliava, come illustra *La fisica nelle cose di ogni giorno*, un libro di James Kakalios, allegato a richiesta con «Le Scienze» di settembre.

Giornate di scienza

Non solo, la fisica non è inutile (e nemmeno noiosa), ma addirittura può raccontarci un mondo affascinante (e curioso) con cui conviviamo 24 ore al giorno, tutti i giorni. Non a caso il libro di Kakalios, professore di fisica e astronomia all'Università del Minnesota, autore di punta della divulgazione scientifica, è il racconto di una giornata qualunque di una persona qualunque.

Si inizia al mattino, con il risveglio e la colazione a casa, si prosegue con una giornata di lavoro in cui sono previsti spostamenti e riunioni (e un breve controllo in ospedale), e si conclude in una stanza d'albergo. In questo lungo arco di tempo incrociamo leggi fisiche negli oggetti che usiamo, come anche nelle tecnologie con una presenza immateriale, almeno per gli utenti (avete presente il Wi-Fi, e più in generale le reti con cui comunicano i dispositivi elettronici?). In altre parole, le nostre giornate sono un concentrato di fisica classica, termodinamica, elettromagnetismo, meccanica quantistica e relatività generale, non di rado in azione nello stesso oggetto.

Perché se è possibile spiegare come funziona un tostapane grazie appunto a termodinamica, elettromagnetismo e meccanica quantistica, quando usiamo un cellulare, oltre ai tre ambiti scientifici appena citati, dovremmo ringraziare ogni istante anche Albert Einstein per la sua teoria generale della relatività, che permette un impiego senza errori della tecnologia GPS. Nel libro, inoltre, ci sono accenni di chimica, la cui presenza è fondamentale per capire il funzionamento di alcuni oggetti, per esempio le pile, in ogni loro dimensione e applicazione.

La ricerca è utile

Più in generale Kakalios ci sollecita a guardare al quadro di insieme. Da questo punto di vista, i continui passaggi tra la spiegazione di un concetto di base e la sua applicazione quotidiana sono anche una lezione dell'utilità della ricerca scientifica.

Non è solo una questione che riguarda l'avanzamento del sapere, che già di per sé nobiliterebbe la nostra natura più intima di specie curiosa. Ma è anche, forse soprattutto, una questione che riguarda la nostra capacità di andare avanti, di specie che vuole svincolarsi dai limiti posti da biologia ed evoluzione, assicurando salute e benessere a un gran numero di esseri umani. Con la speranza che quel numero aumenti sempre di più.

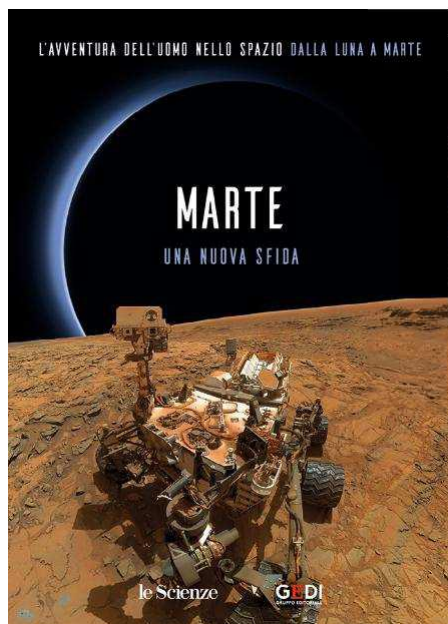
Ultime uscite di *L'avventura dell'uomo nello spazio*, una collana settimanale, a richiesta con «Le Scienze», «la Repubblica» o altre testate GEDI

In edicola

Lo spazio di ieri, oggi e domani

Ne abbiamo fatta di strada da quel 20 luglio 1969. A voler essere epici, si potrebbe dire che quella prima impronta di un essere umano lasciata sulla Luna rappresenta nella storia della nostra specie qualcosa di simile alla prima uscita dei nostri antenati dal continente africano, la culla dell'umanità, avvenuta circa 70.000 anni fa. Da quel momento in poi abbiamo colonizzato ogni continente della Terra, oggi cerchiamo di spingerci sempre più in profondità nello spazio. Abbiamo costruito una gigantesca casa comune in orbita attorno alla Terra: la Stazione spaziale internazionale. Le sonde robotiche hanno già raggiunto tutti i pianeti del sistema solare, alcune loro lune, asteroidi e una cometa. Le missioni umane invece si sono fermate alla Luna, dove è dal 1972 che non mettiamo più piede.

Nel frattempo sono comparsi nuovi protagonisti e obiettivi in quella che sembra essere una nuova corsa allo spazio. Oltre a Stati Uniti e Russia, erede dell'ex Unione Sovietica, oggi Europa, Cina, Giappone e India hanno un ruolo di primaria importanza nella nuova frontiera dell'umanità, che inizia a essere frequentata anche da numerose società private. E la colonizzazione di Marte è un traguardo tra i più citati e controversi.

Per capire che cosa potrebbe riservarci il futuro e ripercorrere gli eventi che hanno segnato la nostra storia oltre le colonne d'Ercole dell'atmosfera terrestre, tra cui l'impresa di cinquant'anni fa dell'Apollo 11, dal 29 giugno abbiamo iniziato a pubblicare *L'avventura dell'uomo nello spazio. Dalla Luna a Marte*, una collana settimanale in otto volumi, che include anche il racconto dei protagonisti di oggi dell'avventura spaziale. È possibile acquistare ciascun volume con «Le Scienze», «la Repubblica» o altre testate del gruppo GEDI, a 9,90 euro oltre il prezzo della rivista o della testata.

PIANO DELL'OPERA

29 GIUGNO
L'allunaggio
La missione Apollo11

6 LUGLIO
2024
Ritorno sulla Luna

13 LUGLIO
Il programma Apollo
La corsa allo spazio

20 LUGLIO
Lo Space Shuttle
La navicella delle stelle

27 LUGLIO
La Stazione spaziale internazionale
La vita in orbita

3 AGOSTO
Marte
Una nuova sfida

10 AGOSTO
Il futuro dello spazio
Asteroidi e space economy

17 AGOSTO
L'inizio dell'avventura spaziale
Le prime missioni

Nel laboratorio diretto da Barbara Mazzolai la robotica si unisce alla biologia con l'obiettivo di sviluppare automi innovativi

Costruire robot ispirandosi alla natura

Barbara Mazzolai dirige un laboratorio singolare. A metterci il naso si vede chi lavora con fili e circuiti, chi ha la testa infilata nel computer, e chi compone acquari pieni di animali che paiono usciti da un cartone animato di fantascienza o maneggia strane piante rampicanti. È il Centro di micro-biorobotica (CMBR) dell'Istituto italiano di tecnologia, sede di Pontedera. Mettere il naso nel curriculum di Mazzolai fa più o meno lo stesso effetto: biologa, ha un dottorato in ingegneria dei microsistemi e un master in eco-management. E una sfilza di premi e riconoscimenti lunga così: l'ultimo è il premio Carla Fendi, ricevuto con Cecilia Laschi, professoressa alla Scuola superiore Sant'Anna di Pisa.

Mazzolai, lei ha ricevuto numerosi riconoscimenti, compresa la medaglia del Senato della Repubblica italiana, ed è stata inserita tra le 25 donne geniali della robotica 2015 da Robohub, la comunità internazionale degli esperti di robotica.

Beh, sì, anche grazie ai miei collaboratori! Adesso sono entusiasta soprattutto perché grazie al premio Carla Fendi finanzieremo una nuova borsa di studio per un giovane ricercatore. Si chiamerà borsa Fendi! Al di là del gioco di parole, è davvero un privilegio per noi.

Veniamo al suo lavoro: la biorobotica. Di che cosa si tratta?

Il significato può essere ampio. Nella nostra accezione è robotica ispirata alla natura: si tratta cioè di costruire robot a partire dallo studio di organismi naturali. Siamo all'intersezione tra robotica e biomimetica, dove la biomimetica è un'idea antica che ha avuto il suo maestro in Leonardo da Vinci.

Quanto agli obiettivi della biorobotica, si tratta di risolvere problemi concreti. Ma anche, e questa è una peculiarità a cui tengo molto, di offrire strumenti di studio della natura. Cioè: partendo dal principio biologico possiamo costruire un robot e poi tornare indietro alla biologia per validare ipotesi che nella complessità di un sistema naturale non possono essere studiate.

Lei è partita dalla biologia per approdare alla robotica...

Sì: ho iniziato con la biologia marina e con il polpo robot. Insieme a Cecilia abbiamo avviato un progetto europeo senza intenzioni applicative dirette, che ci ha permesso di introdurre l'idea della robotica soffice.

Il polpo ha un corpo morbido (eccetto il becco), si muove in tutte le direzioni, modifica la rigidità del proprio corpo, si allunga e si accorcia, soprattutto ha un'intelligenza distribuita, ovvero ha la

Idea dalla biomimetica. Un robot plantoide, ovvero ispirato alle piante, assemblato da Barbara Mazzolai e colleghi.

di Silvia Bencivelli

CHI È

BARBARA MAZZOLAI

È laureata in biologia marina e ha conseguito un dottorato in ingegneria dei microsistemi. Dal 2012 al 2015 è stata coordinatrice del progetto europeo FET-Open Plantoid nel cui ambito ha realizzato il primo robot al mondo ispirato alle radici delle piante per il monitoraggio del suolo.
Da gennaio 2019 è coordinatrice di un nuovo progetto europeo FET-Proactive, denominato GrowBot, che prevede la realizzazione di tecnologie e robot ispirati alle piante rampicanti.
È direttrice del Centro di micro-biorobotica a Pontedera dell'Istituto italiano di tecnologia (IIT) di Genova ed è stata vice direttore con delega al funzionamento dei centri della rete IIT da luglio 2012 a luglio 2017.

maggior parte dei neuroni nelle braccia invece che nel cervello. Questo ci ha permesso di passare da un modello centralizzato a uno distribuito a seconda della complessità del corpo e delle sue interazioni con l'ambiente.

Con le piante robot cambia la strategia ma non la filosofia, e la si porta all'estremo: nelle piante un cervello non c'è proprio, ci sono però milioni di apici nelle radici e nella parte apicale ed è il massimo dell'espressione dell'intelligenza diffusa.

Che cosa cambia con l'intelligenza diffusa rispetto all'intelligenza centralizzata?

Quella diffusa è una forma di intelligenza più versatile, nella quale è il corpo a prendere decisioni a seconda di come interagisce con l'ambiente. Con l'intelligenza centralizzata invece è possibile eseguire molto bene un compito preciso, tuttavia è difficile che il robot sia capace di compiere più azioni oppure agire in ambienti non strutturati: per di più, se lo fosse, il suo costo energetico aumenterebbe.

L'intelligenza diffusa propone un cambio di paradigma, insomma. Ormai in robotica l'idea è passata e i gruppi al lavoro in tutto il mondo sono tanti, ma c'è ancora tanto lavoro da fare.

Ecco: come funziona il lavoro in biorobotica?

Funziona con il lavoro di figure diverse. Si parte dalla biologia, ovvero dallo studio del modello biologico: si usa la letteratura scientifica ma si fanno anche ricerche *ad hoc*, perché le domande che ci poniamo noi sono spesso diverse da quelle che si pone un biologo. Noi per esempio ci concentriamo sui materiali o sulla biomeccanica. Poi si arriva alla progettazione. A questo punto c'è chi fa il controllo, chi il *design*, chi i test. Ma anche questo metodo di lavoro ce lo siamo inventati, e probabilmente anche qui c'è da migliorare.

Persino in questo lei è stata una pioniera.

In un certo senso sì. Ed è una delle cose che trovo affascinanti, e insieme complesse, del mio lavoro: servono competenze diverse e serve che si parlino. A volte un linguaggio comune non esiste e va inventato. Non solo: la didattica è tutta da inventare. Qui non basta aprire un manuale e studiare, bisogna essere duttili, imparare ad affrontare la sfida. E c'è un certo margine di rischio. Forse i premi sono importanti anche per questo, perché consolidano linee di ricerca innovative e ancora «chi lo sa».

Perché parla di rischio?

Perché la robotica soffice non ha ancora prodotto niente che sia arrivato sul mercato: in fondo, potrebbe avere successo oppure no. Siamo ancora senza standard, senza tendenze. Per adesso ci sono sviluppi sempre più interessanti in agricoltura e in medicina, e ci sono enormi potenzialità: si sta cominciando a parlare, per esempio, di ibridi di robotica tradizionali e soffici. Ma ripeto: siamo agli inizi.

La sua scommessa allora qual è?

Mi affascina il concetto dei robot che si adattano all'ambiente perché si porta dietro tante altre sfide tecnologiche e scientifiche. Per esempio potrebbero diventare robot per le ispezioni ambientali, sotto le macerie di un terremoto, dentro pozzi industriali ma anche sulla superficie di altri pianeti. E poi, proprio perché puoi farli crescere, vedo molte connessioni possibili con l'architettura. Poi c'è la filiera del monitoraggio, dello studio degli ambienti.

Sì, credo che un impiego chiave sarà questo: i robot soffici saranno per noi soprattutto strumento di conoscenza. E penso che ce la faremo: prima o poi nasceranno anche corsi di laurea indirizzati verso la robotica soffice.

È vero che nella robotica (non solo quella bio) gli italiani sono tra i migliori al mondo?

Certamente sì, sia a livello di ricerca sia con la robotica industriale. Se non siamo i primi al mondo, siamo i secondi. Forse questo dipende dalla nostra lunga tradizione nella meccanica.

E lei in quel mondo, con la sua laurea in biologia, non è un'anomalia?

Di nuovo, sì! Però già in tesi ho lavorato con i fisici, perché ho fatto una tesi di biofisica, poi ho preso un dottorato in ingegneria, e mi sono trovata tra gli ingegneri. È andata così.

Mentre non è anomalo il fatto che sia donna.

No, nel nostro settore siamo praticamente 50 e 50. Semmai è tutto il settore a essere anomalo rispetto al resto dell'ingegneria! Perché nella robotica tradizionale i maschi sono decisamente di più. Tuttavia, da noi come nell'ingegneria biomedica le donne sono la metà.

Mi sono chiesta più volte il perché. Può darsi che sia perché la parte biologica, così come quella medica, ci attira di più. Per quanto mi riguarda, non credo di ricevere più curriculum da parte di donne o di prediligere le donne al momento della scelta. Secondo me è proprio il nostro settore che, come ha attirato me, attira sempre più studentesse.

Cortesia Barbara Mazzolai/Istituto italiano di tecnologia (*tutte le foto, 2*)

Biofuture Medicine ha sviluppato e messo in commercio un metodo grazie a cui produrre organoidi per la medicina di precisione

Un kit per creare piccoli organi

L'idea della *start-up* Flavio Rizzolio ce l'aveva in mente da quando era ragazzo. D'altra parte, però, l'amore per la scienza e in particolare per la biologia lo spingeva verso una strada che ai più non sembrava conciliabile con il suo sogno. Ma a volte è solo questione di tempo, e di esperienze accumulate. Così dopo la laurea in scienze biologiche, una specializzazione in genetica applicata, un dottorato in genetica oncologica – titoli conseguiti in tre diversi atenei – il giovane ricercatore va negli Stati Uniti, alla Temple University, dove studia i meccanismi di alterazione cellulare che provocano la degenerazione tumorale.

«Era il 2012 e a quel punto ho ricevuto una proposta per rientrare in Italia e cambiare nuovamente settore di studio: avrei dovuto occuparmi di nanomedicina per la lotta al cancro», racconta Rizzolio. «Ho accettato e sono arrivato al Centro di riferimento oncologico (CRO) di Aviano, dove ancora oggi svolgo alcune attività di ricerca. Ma tutte le esperienze che avevo accumulato nel corso degli anni mi convincevano ancora di più che era venuto il tempo di dare forma alla mia idea iniziale, quella che coltivavo fin dai tempi dell'università: fondare un'azienda».

Un lavoro traslazionale

Da sempre impegnato sul versante della ricerca di base, alla scoperta dei meccanismi molecolari che provocano le malattie, Rizzolio vuole ora concretizzare le sue conoscenze. Al CRO di Aviano porta avanti le sue ricerche ma ha anche modo di vedere i pazienti, e così il suo lavoro diventa traslazionale: dal laboratorio al letto del malato e viceversa. Il 2016 è l'anno della svolta: nel giro di pochi mesi vince un concorso per un posto all'Università Ca' Foscari di Venezia, al Dipartimento di scienze molecolari e nanosistemi, e fonda uno *spin-off*: Biofuture Medicine. «L'idea portante dell'azienda nasce dall'esperienza maturata ad Aviano, dalle difficoltà con cui ci siamo scontrati cercando di portare le conoscenze sviluppate nei laboratori realmente al servizio dei malati», spiega il ricercatore. «Per accelerare i tempi della terapia e migliorarne gli effetti, devono essere sviluppati test sempre più accurati che permettano di prevedere, a partire dalle cellule del paziente, se una determinata molecola funzionerà o meno. È la medicina di precisione di cui tanto si parla negli ultimi anni».

Il gruppo di Rizzolio ha iniziato a lavorare prima su colture cellulari tradizionali, quelle nelle piastre, per passare a quelle in 3D e poi arrivare agli organoidi e ai tumoroidi. «Si tratta di organi tridimensionali microscopici ottenuti a partire da poche cellule che si auto-organizzano con le funzioni dell'organo di partenza: sano nel primo caso, malato nel secondo. Lo sviluppo e lo studio di organoidi sono sicuramente tra i più grandi avanzamenti scientifici degli ultimi anni», spiega Rizzolio. Il problema però è che mettere a punto le colture cellulari da cui far sviluppare gli organoidi non è affatto banale: in letteratura i dati sono pochi. «Il risultato è che per partire e rendere riproducibile anche da altri quello che facevamo, abbiamo impiegato molto tempo», va avanti il ricercatore. «Ma proprio questa difficoltà ha acceso la lampadina: perché non creare un kit per far crescere organoidi in maniera semplice e immediata, senza necessità di tutto il tempo che abbiamo sacrificato noi?». Detto fatto.

Cortesia Biofuture Medicine (*tutte le foto in questa pagina e nella pagina a fronte*)

Biofuture Medicine ha messo in commercio un kit che permette agli scienziati di far crescere *in vitro* cellule di un tessuto normale o tumorale su cui sperimentare test diagnostici e terapie innovative, per esempio. «Offriamo ai colleghi ricercatori di tutto il mondo uno strumento affidabile con cui effettuare la loro ricer-

di Letizia Gabaglio

Come sono.
Sotto, un organoide di colon murino; accanto, un organoide di fegato murino che esprime la proteina GFP, a fluorescenza verde. In basso, un microscopio usato per studiare campioni sfruttando la fluorescenza.

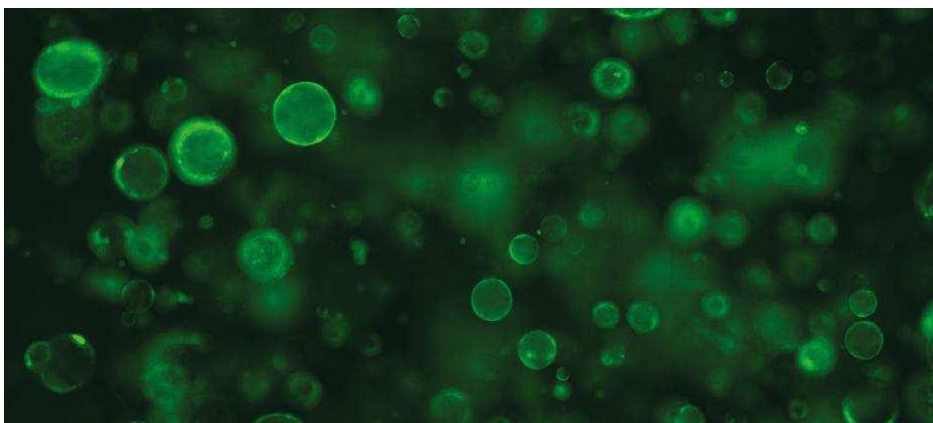
LA SCHEDA - BIOFUTURE MEDICINE

Azienda fondata nel 2016

Persone di riferimento: Flavio Rizzolio (CEO e fondatore), Isabella Caligiuri (fondatrice)

Sito: http://www.biofuturemedicine.com **Mail:** info@biofuturemedicine.com

Numero di brevetti: n.d.

Dipendenti-collaboratori: 2

ca sul cancro. Altri laboratori, oltre al nostro, sono in grado di produrre organoidi, ma arrivare a un metodo standard che garantisca risultati richiede molto tempo e investimenti ingenti. Usando il kit, un laboratorio può dedicarsi totalmente alla ricerca sulle migliori terapie», sottolinea il biologo.

Fare ricerca quindi, ma anche migliorare la clinica. Come dimostra il progetto PREDIzione Tumori Tiroidei (PREDITT), finanziato dalla Regione Friuli-Venezia Giulia, a cui Biofuture Medicine partecipa insieme a un'altra azienda e all'Università di Udine: partendo da un campione di tumore alla tiroide ottenuto dall'operazione di asportazione, il gruppo vuole creare un sistema per produrre e studiare un organoide specifico per ogni paziente, in modo da capire a quale terapia il tumore risponde meglio. Standardizzare il processo di sviluppo di questi organi in miniatura servirebbe anche ai produttori di farmaci: per le piccole aziende sarebbe un modo per ottenere risultati preliminari molto precisi e validi, e quindi convincere le grandi aziende farmaceutiche a investire sui loro prodotti; per tutte sarebbe una via per sostituire sempre di più i test sui modelli animali. «In futuro vorremmo collaborare con le aziende farmaceutiche e offrire loro questo servizio in modo che si possano testare da subito le molecole e selezionare solo quelle più promettenti», dice il ricercatore.

Un presente nell'alimentazione e futuro nanotech

Nei piani di Biofuture Medicine ci sono anche applicazioni che prendono spunto dagli studi effettuati da Rizzolio nel campo della nanomedicina: per esempio lo sviluppo di nanoparticelle di origine organica e inorganica per incapsulare differenti composti e quindi somministrare in maniera sempre più specifica i farmaci oncologici. A fianco del biologo, nella vita così come nel lavoro, c'è Isabella Caligiuri, co-fondatrice dell'azienda. I due si sono conosciuti negli Stati Uniti e da quel momento hanno condiviso il percorso di studi.

«Ma oltre alla ricerca di laboratorio, mi sono sempre interessata anche di alimentazione e di come gli stili di vita abbiano un impatto sulla prevenzione dei tumori e delle malattie cardiometaboliche», racconta Caligiuri. «Così, sempre nello spirito di capitalizzare quelle che sono le nostre conoscenze ho sviluppato una serie di corsi di formazione su temi molto sentiti, come l'alimentazione dei neonati o dei bambini».

Un pacchetto di incontri che ha avuto subito un grande successo e che quindi fa parte integrante dei servizi offerti dalla società. Perché l'incontro fra la passione per la scienza e lo spirito d'impresa è possibile. Basta volerlo.

di Piergiorgio Odifreddi

professore ordinario di logica matematica all'Università di Torino
e *visiting professor* alla Cornell University di Ithaca (New York)

Per un battito d'ali

L'effetto che illustra il caos deterministico è noto come effetto farfalla, ma non è stato sempre così

L'effetto farfalla è una delle poche nozioni matematiche che siano riuscite a superare le barriere del linguaggio tecnico per diventare un'espressione del linguaggio comune, per quanto fraintesa. Il suo significato è che in certi fenomeni deterministici, come l'evoluzione del tempo atmosferico, piccole variazioni degli *input* possono portare a grandi cambiamenti degli *output*, rendendo di fatto caotico il fenomeno descritto. In altre parole, l'effetto farfalla intende illustrare il cosiddetto «caos deterministico», che spesso viene scambiato per un «determinismo caotico»: l'idea, cioè, che grandi effetti possano essere prodotti da piccole cause.

Il gabbiano di Gadda

È interessante risalire all'indietro, per ricostruire l'evoluzione dei «vermi nati a formar l'angelica farfalla». Il punto di partenza è la conferenza *Predictability; Does the Flap of a Butterfly's Wings in Brazil Set Off a Tornado in Texas?* che Edward Lorenz del Massachusetts Institute of Technology tenne il 29 dicembre 1972 al *meeting* dell'American Association for the Advancement of Science, iniziando con una messa in guardia dai fraintendimenti: «Se un solo battito d'ali di una farfalla può generare un tornado, lo stesso possono fare tutti i successivi battiti d'ali di quella farfalla, e i battiti di milioni di altre farfalle, per non parlare delle azioni di innumerevoli creature più grandi, inclusi noi. Inoltre, se un battito d'ali di una farfalla può generare un tornado, può anche contribuire a prevenirlo».

L'immagine della farfalla era una variazione di quella usata nella frase di chiusura del pionieristico articolo del 1963 *The Predictability of Hydrodynamic Flow*, in cui Lorenz aveva discusso per la prima volta i princìpi della sua teoria: «Un meteorologo ha notato che se la teoria fosse corretta, un battito d'ali di un gabbiano potrebbe cambiare il comportamento del tempo atmosferico per sempre. La controversia non è ancora stata risolta, ma l'evidenza recente sembra dar ragione ai gabbiani».

Sorprendentemente, un'immagine simile era già stata anticipata nel 1954 dall'ingegner Carlo Emilio Gadda nel racconto *L'egoista*: «Tra qualunque essere dello spazio metafisico e l'io individuo (io-parvenza, io-scintilla di una tensione dialettica universale) intercede un rapporto pensabile: e dunque un rapporto di fatto. Se una libellula vola a Tokyo, innesca una catena di reazioni che raggiungono me».

La libellula di Gadda diventerà dieci anni dopo il gabbiano dell'anonimo meteorologo citato da Lorenz, e vent'anni dopo la definitiva farfalla. A meno che non si trattasse di una farfalla fin dagli inizi, visto che già nel 1952 lo scrittore di fantascienza Ray Bradbury aveva immaginato, nel racconto *Rumore di tuono*, che nel 2055 dei cacciatori di dinosauri partecipanti a un safari nel passato schiacciassero inavvertitamente una farfalla, e tornati nel loro presente trovassero un presidente diverso da quello che avevano lasciato partendo. L'uccisione di una farfalla può cambiare 60 milioni di anni dopo il risultato di un'elezione.

L'attrattore che vince

Ma si può addirittura risalire al 1918, e leggere nell'articolo *A Much-Needed Change of Emphasis in Meteorological Research* di William Franklin: «L'atmosfera è instabile, e anche un suo minimo disturbo può innescare un collasso generale. Così una cavalletta nell'Idaho potrebbe dare inizio a una tempesta che spazzasse il continente e distruggesse New York, o una mosca in Arizona una tempesta che andasse a perdersi nel Golfo del Messico».

Naturalmente, un simbolo vale l'altro. Ma le farfalle vincono facilmente su mosche, libellule, cavallette e gabbiani, almeno per un motivo: perché l'attrattore di Lorenz che descrive il comportamento caotico della sua equazione somiglia appunto alle due ali di una farfalla, e il simbolo diventa anche un'icona.

di Telmo Pievani

professore ordinario di filosofia delle scienze biologiche
dell'Università degli Studi di Padova

L'unione fa la sopravvivenza

L'ibridazione tra specie è un'ottima soluzione per adattarsi a drastici cambiamenti ambientali

Unirsi, fondersi, ibridarsi allegramente è meglio che dividersi, scindersi, ramificarsi lentamente. Detto così, sembra uno slogan matrimoniale, ma una parte della scienza dell'evoluzione pare proprio aver preso questa china. L'ibrido funziona.

Lo Houston Ship Channel è un posto infernale, l'ultimo in cui ci si aspetterebbe di vedere all'opera la creatività della natura. Attraversa per decine di chilometri un'area industrializzata tra il porto di Houston e la baia di Galveston, in Texas. Da un secolo, nelle acque di questo canale finiscono gli inquinanti più terribili: è il festival degli idrocarburi, un'enciclopedia di liquami umani e di sostanze mutagene e teratogene che uccidono o trasfigurano larve e adulti di molte specie. Eppure, in meno di 100 anni, un battito di ciglia per l'evoluzione, qualcuno in quella discarica ha imparato a sguazzarci: è un pesce d'acqua dolce del Golfo del Messico, *Fundulus grandis*, campione di adattabilità e di stomaco forte.

Evoluzione veloce

Come è riuscito nell'impresa? Secondo Elias M. Oziolor dell'Università della California a Davis e colleghi, autori di una sorprendente pubblicazione su «Science», la dinamica sarebbe stata alquanto imprevedibile.

Il cugino *F. heteroclitus*, un altro pesce che tollera condizioni estreme (è stato il primo pesce a viaggiare nello spazio), vive sulla costa atlantica a più di 1500 chilometri di distanza, ma caso vuole che abbia preso un passaggio verso ovest nelle acque di zavorra delle navi, colonizzando la baia di Galveston. Grazie allo zampino umano le due specie si sono quindi ibridate, cioè si sono incrociati esemplari delle due popolazioni mescolando i loro geni, con il risultato di garantire a *F. grandis* la variabilità genetica sufficiente per adattarsi rapidamente alle nuove condizioni di estremo deterioramento ambientale, tra una petroliera e l'altra.

Il tutto in meno di 30 generazioni. I geni di *F. grandis* recanti la firma di una selezione naturale recente per l'adattamento alle sostanze tossiche provengono da introgressione genetica con *F. heteroclitus*. Che l'evoluzione darwiniana possa essere veloce e che la si possa registrare in presa diretta nei genomi ormai è risaputo, ma in questo caso si nota anche che la connettività tra le specie può essere una fonte decisiva di variazione adattativa, soprattutto per non soccombere all'estinzione in caso di cambiamenti ambientali drastici.

Pur sempre un albero

L'ibridazione è in auge. Nel 2017 è stata annunciata la scoperta della nascita di una nuova specie di fringuelli delle Galápagos, sull'isola di Daphne Major, in pochissime generazioni, per ibridazione tra femmine della specie autoctona e un solo fringuello maschio immigrato da un'altra isola. Gli ibridi hanno un becco adattato, si sono moltiplicati e hanno fondato una nuova linea di discendenza.

L'ibridazione sembra aver fatto bene anche a noi, se è vero che tratti dovuti a introgressione genetica da due specie cugine, l'uomo di Neanderthal e l'uomo di Denisova, hanno avuto un valore adattativo riscontrabile ancora oggi in popolazioni di *Homo sapiens* i cui antenati si incrociarono con loro fino a 40 millenni fa. È il caso dei popoli tibetani il cui adattamento all'altitudine ha una firma genetica che risale all'ibridazione con i Denisoviani.

Il fascino dell'ibrido spinge alcuni a ipotizzare la crisi dell'albero della vita, sostituito da modelli a rete dove tutti si accoppiano e si ibridano un po' con tutti. Meglio non correre troppo. Abbiamo di certo capito che l'ibridazione è importante non solo nelle piante, ma anche negli animali. Dobbiamo aggiungerla come ulteriore fattore di variabilità genetica, che è il combustibile dell'adattamento per selezione naturale, e persino di speciazione. L'evoluzione resta un maestoso albero, ma con un buon numero di fili che connettono i rami tra loro.

Parente salvifico. Esemplare di *Fundulus heteroclitus*, la specie che ha contribuito a una variabilità genetica chiave per la sopravvivenza del cugino *F. grandis* nelle acque inquinate del Golfo del Messico, di fronte alla costa statunitense.

Cortesia Andrew Whitehead

di Giorgio Manzi

ordinario di paleoantropologia alla Sapienza Università di Roma;
socio corrispondente dell'Accademia Nazionale dei Lincei

Antenati siberiani

Analizzato il DNA dei progenitori dei primi *Homo sapiens* che popolarono le Americhe

Li hanno chiamati «Antichi Siberiani del Nord» (ANS). Sono i progenitori dei primi *Homo sapiens* che penetrarono da Bering nelle Americhe, popolando il continente da nord a sud nel tardo Pleistocene e poi nell'Olocene. È la prima volta che un legame genetico così stretto viene registrato fuori dal territorio americano. Lo studio è apparso sulle pagine di «Nature» il mese scorso.

Il DNA degli ANS è stato estratto da due denti da latte: gli unici resti umani che sono stati rinvenuti in un esteso sito archeologico vicino al Fiume Yana, nell'estrema Siberia nord orientale, datato a circa 32.000 anni dal presente. Il sito, noto come Sito del Corno di Rinoceronte, era stato scoperto nel 2001 e negli anni ha restituito più di 2000 manufatti in osso e in avorio, oltre a strumenti in pietra e a resti di capanne. L'insieme dei dati raccolti mostra che questi uomini del Paleolitico si erano adattati a condizioni climatiche estreme, erano molto mobili sul territorio e vivevano prevalentemente di caccia a mammut, rinoceronti lanosi e bisonti.

Più europei che asiatici

Il loro genoma ci dice molto. Si stima che la popolazione a cui appartenevano quei denti da latte doveva essere composta da circa 40 individui. A differenza dei Neanderthal, di poco più antichi, questa popolazione di *Homo sapiens* non sembra avere sofferto di endogamia, ma piuttosto mostra di essere stata in relazione esogamica con una rete di altre popolazioni, composta nel suo insieme da almeno 500 persone.

I ricercatori hanno esteso lo studio al confronto con 34 campioni di DNA umano proveniente da siti di varia antichità, che spaziano dalla Russia centrale alla Siberia. Da qui emerge un dato che la morfologia dei nativi americani da tempo suggeriva e cioè che questi ANS, probabili progenitori sia degli indios sudamericani sia di parte degli indiani del Nord America, sarebbero geneticamente più prossimi agli europei che non agli asiatici, come se, subito dopo la divergenza tra questi due grandi ceppi umani, gli ANS fossero migrati nella Siberia più settentrionale da occidente (e non dal Sudest asiatico).

Un anello tra le due sponde

Gli ANS sarebbero pertanto alla radice della variabilità genetica che si osserva oggi in una vasta area, compresa fra Asia e Sud America, come fossero una sorta di anello che ancora mancava per la piena connessione filogenetica fra le due sponde dell'Oceano Pacifico, combinando il DNA delle attuali popolazioni di lingua paleosiberiana e dei nativi americani. Probabilmente non da soli, però. Nello stesso studio si dimostra infatti che gli ANS si sarebbero in seguito mescolati con uomini di origine più propriamente asiatica. Questa conclusione si basa sull'analisi del DNA di un individuo di sesso maschile, rinvenuto in un sito siberiano ancora più prossimo a Bering, lungo il corso del fiume Kolyma, e datato a circa 10.000 anni dal presente. L'individuo mostra una combinazione fra il DNA degli ANS a quello di popoli dell'Asia orientale, risultando simile a quella dei nativi americani.

La storia dei discendenti degli ANS è in parte già nota e viene sempre meglio documentata da un insieme di dati archeologici, antropologici e genetici, che si sono accumulati nei decenni scorsi e in particolar modo negli ultimi anni. Abbiamo così acquisito importanti informazioni sulle vicende popolazionistiche che si sono verificate a partire dai tempi dell'ultimo massimo glaciale (il periodo più rigido della più recente glaciazione), quando gruppi nomadi di cacciatori-raccoglitori attraversarono ponti di terra oggi scomparsi. Poi, in almeno tre grandi ondate di diffusione e seguendo due principali rotte (una costiera e l'altra più interna), colonizzarono le Americhe nel corso degli ultimi 20.000 anni.

di Amedeo Balbi

professore associato di astronomia e astrofisica
al Dipartimento di fisica dell'Università di Roma Tor Vergata

Un drone per il cielo di Titano

La sonda Dragonfly della NASA volerà nell'atmosfera della luna di Saturno e si poserà più volte sulla superficie

In questa rubrica non mi sono finora mai occupato di Titano, ed è piuttosto sorprendente. La più grande luna di Saturno è un posto straordinario, unico nel sistema solare. Tanto per dirne una: è il solo luogo, a parte la Terra, ad avere contemporaneamente un'atmosfera, una superficie solida e del liquido che scorre sulla superficie stessa.

Solo che, a differenza del nostro pianeta, il liquido non è acqua, ma una miscela di idrocarburi, prevalentemente metano ed etano.

Perché tornare

In effetti, Titano potrebbe sembrare una bizzarra versione a bassissima temperatura di pianeta terrestre: il termometro laggiù staziona attorno ai -180 °C, tuttavia su Titano ci sono fiumi e laghi, spiagge e montagne, e molto probabilmente precipitazioni e un ciclo geologico simile a quello dell'acqua qui sulla Terra. È anche possibile che, come molte altre lune dei pianeti giganti, anche Titano abbia acqua liquida nel sottosuolo. C'è inoltre una tale abbondanza di composti del carbonio da rendere Titano il paradiso dei chimici organici. Cosa ancora più interessante, su Titano potrebbero avere luogo reazioni simili a quelle che, forse, avvenivano sulla Terra primordiale quando è apparsa la vita.

Si tratta insomma di un laboratorio naturale per investigare la chimica prebiotica e le condizioni che rendono un pianeta potenzialmente abitabile. Naturalmente, se la vita avesse davvero trovato una strada su Titano (cosa che, per quanto ne sappiamo al momento, non è molto probabile), si tratterebbe di qualcosa di lontanissimo da ciò a cui siamo abituati.

Queste sono solo alcune delle ragioni per cui vale la pena studiare Titano più da vicino. Quasi tutto quello che sappiamo sulla fredda luna di Saturno ce lo ha svelato la missione Cassini-Huygens dell'Agenzia spaziale europea (ESA), terminata ormai da qualche anno (*si veda il numero di settembre 2017*). In particolare, la discesa di Huygens su Titano, nel 2005, è stata un'impresa straordinaria, che non solo ci ha mostrato le prime immagini ravvicinate della superficie del satellite, ma ha anche dato all'ESA un posto importante nella storia dell'esplorazione spaziale.

Maratoneta da record

Ora, però, la NASA ha deciso di alzare la posta, con una missione che sembra arrivare direttamente dalla fantascienza. Di recente, l'agenzia statunitense ha approvato la realizzazione di una sonda automatica da quasi un miliardo di dollari, che sarà in grado di volare attraverso la densa atmosfera di Titano, per posarsi in diversi punti della sua superficie. La sonda, che si chiamerà Dragonfly e la cui partenza è attualmente prevista per il 2026, si sposterà grazie a otto rotori simili a quelli dei droni terrestri, e sarà alimentata da una batteria a radioisotopi.

Potrà compiere tragitti massimi di circa otto chilometri, ognuno dei quali durerà quanto un giorno su Titano (circa 16 giorni terrestri), per una durata complessiva di quasi tre anni (tuttavia la batteria potrebbe durare anche otto anni, un'eventualità che rende quantomeno possibile ipotizzare un'estensione della missione). Il che dovrebbe portare Dragonfly non solo a essere una delle pochissime sonde che volerà nell'atmosfera di un altro mondo, ma anche a essere quella che percorrerà più strada: la NASA prevede una distanza totale sulla superficie di Titano di circa 175 chilometri, ovvero più del doppio di quella percorsa da tutti i *rover* marziani.

Dragonfly fotograferà dunque la superficie di Titano, sorvolerà i suoi laghi, i suoi fiumi e le sue montagne, raccoglierà dati sull'atmosfera e sulla chimica, e insomma ci darà un quadro davvero approfondito di questo mondo incredibile. C'è ancora parecchio da aspettare, però, perché l'arrivo non è previsto prima del 2034.

Una sonda automatica. La partenza della missione Dragonfly della NASA è prevista per il 2026, ma il suo arrivo su Titano, che esplorerà muovendosi nella sua densa atmosfera, non è previsto prima del 2034.

Cortesia NASA/JHU-APL

BIODIVERSITÀ

Le piante si estinguono in silenzio

Quelle a seme stanno scomparendo a una velocità doppia degli animali

iStock/KubilayAdemir

Uno del gruppo. Uno dei membri della famiglia delle spermatofite è il girasole. Secondo un'analisi su centinaia di migliaia di specie, le piante a seme stanno soffrendo un tasso di estinzione ben più elevato rispetto ai vertebrati.

Il dibattito sulla possibilità che gli esseri umani siano responsabili di una nuova estinzione di massa, la prima nella storia del pianeta causata da un suo inquilino, si arricchisce di un nuovo capitolo. A pagare il tributo della nefasta convivenza con la nostra specie non sono solo api e tigri ma anche organismi tanto comuni quanto invisibili ai nostri occhi per quel distacco che ci porta a considerarle come un generico «verde»: le piante. Secondo un corposo studio pubblicato su «Nature Ecology & Evolution», e coordinato dal botanico Rafaël Govaerts del Royal Botanic Gardens di Kew a Londra e dal biologo evoluzionista Aelys Humphreys dell'Università di Stoccolma, il tasso di estinzione delle spermatofite – le cosiddette piante superiori, cioè quelle a seme – è oltre il doppio rispetto a quello osservato negli animali vertebrati. L'indagine si è basata sulla banca dati costruita dallo stesso Govaerts in trent'anni di carriera e ha superato di un ordine di grandezza qualunque altro studio precedente.

L'analisi delle oltre 330.000 specie catalogate dal botanico è iniziata solo nel 2015, in seguito all'incontro con Humphrey. Delle piante incluse da Linneo nella prima edizione dello *Species Plantarum* (1753), 1234 sono risultate in un primo momento estinte. Tuttavia, più della metà sono state in seguito escluse perché riscoperte oppure classificate diversamente, riducendo la perdita effettiva a 571 specie. Una cifra quasi quattro volte superiore a quella riportata nella Lista rossa stilata dall'Unione internazionale per la conservazione della natura, che considera estinte del tutto, o comunque allo stato spontaneo, 157 delle 28.287 specie finora valutate. A confronto, nello stesso intervallo di tempo sono scomparse 271 specie di mammiferi, uccelli e anfibi. Restringendo le analisi al periodo compreso tra il 1900 e il 2018, il regno vegetale ha perso quasi tre specie ogni anno, per un totale di 315. Si tratta di un tasso di estinzione forsennato, di oltre 500 volte maggiore di quello atteso in assenza di interferenze. L'estinzione è risultata più marcata tra alberi, arbusti e altre piante legnose perenni piuttosto che tra quelle erbacee.

A livello spaziale, le regioni del mondo più colpite sono le isole seguite dalle aree tropicali e mediterranee, caratterizzate da un'elevata biodiversità e densamente abitate come Brasile, India, Madagascar e Sudafrica. Lo scenario è reso ancora più fosco dalla consapevolezza da parte degli autori di avere quasi certamente sottostimato la reale entità del problema. La scarsa disponibilità di informazioni sulla flora di Africa e America meridionale, unita alla cosiddetta estinzione funzionale di alcune specie, sopravvissute negli orti botanici ma scomparse del tutto o quasi in natura, non lascia presagire nulla di buono.

Davide Michielin

ASTROFISICA

La seconda volta di un lampo radio veloce

Individuata un'altra sorgente extragalattica di queste emissioni brevi e intense

I lampi radio veloci (FRB, dall'inglese «fast radio bursts») sono intense emissioni radio molto brevi – tipicamente dell'ordine del millesimo di secondo – provenienti da sorgenti lontane. La casualità e la fugacità delle loro apparizioni rende molto complessa l'individuazione della sorgente di origine. Ora, però, un gruppo guidato da Keith Bannister, dell'australiana Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), ha annunciato di aver localizzato la sorgente da cui proviene FRB 180924, un FRB non ripetitivo, uno di quelli che si verificano una volta sola, che sono la quasi totalità di questi lampi. Dei circa 90 FRB osservati fino a oggi, solo tre sono ripetitivi. Di questi ultimi, quello con la sigla FRB 121102 è l'unico di cui è stata individuata la galassia ospite.

Individuare la galassia di partenza di un FRB non ripetitivo è molto più complesso, perché in generale l'accuratezza della posizione in cielo non è sufficiente per localizzarli all'interno di una singola galassia ospite. Il risultato di Bannister e colleghi su FRB 180924, descritto su «Science», è stato ottenuto grazie al radiotelescopio Australian Square Kilometre Array Pathfinder (ASKAP), che per primo ha osservato il lampo, e a tre grandi telescopi ottici subito allertati: Keck, VLT e Gemini South. La galassia ospite del lampo, di dimensioni confrontabili alla nostra, dista 3,6 miliardi di anni luce da noi e ha un basso tasso di formazione stellare. Il lampo è stato localizzato in una zona periferica della galassia, a 13.000 anni luce di distanza dal suo centro.

La galassia ospite di FRB 180924 ha caratteristiche molto diverse rispetto a quella di FRB 121102, a indicare che, forse, ci sono almeno due tipi di «progenitori» di questi lampi, di cui ancora oggi non conosciamo l'origine, per quanto siano sicuramente associati a fenomeni astrofisici di alta energia.

Emiliano Ricci

Un nuovo tassello per la particella di Majorana

Nel 1937, pochi mesi prima della sua misteriosa scomparsa, il fisico italiano Ettore Majorana teorizzò una particella con una proprietà molto particolare: è l'unica a essere l'antiparticella di sé stessa. Solo negli ultimi anni alcuni esperimenti hanno evidenziato forti indizi dell'esistenza di questa particella, detta appunto di Majorana, tuttavia molte sue proprietà restano ancora misteriose. Ad aggiungere un tassello importante arriva ora uno studio pubblicato su «Science» da un gruppo di ricerca guidato da Ali Yazdani, della statunitense Princeton University, secondo cui sotto certe condizioni sperimentali le particelle di Majorana sono stabili e molto robuste, aprendo la strada a interessanti applicazioni.

Per via delle loro caratteristiche così peculiari, le particelle di Majorana possono essere osservate solo in condizioni fisiche molto particolari. Per riuscire a «scovarle» è indispensabile avere a disposizione un materiale superconduttore (ovvero un materiale in cui la corrente elettrica scorre senza resistenza) sul quale «appoggiare» uno strato sottilissimo di atomi magnetizzati (per esempio di ferro). Yazdani e colleghi hanno verificato che un metodo ancora più efficiente per osservare e controllare la particella di Majorana è combinare un superconduttore a un «isolante topologico», ovvero un materiale in cui gli elettroni scorrono solo lungo i bordi, in presenza di un campo magnetico. In particolare i ricercatori sono riusciti a osservare particelle di Majorana nel «canale» formatosi tra il bordo dell'isolante topologico e il superconduttore, verificando anche una proprietà imprevista: le particelle si osservano solo se il campo magnetico è orientato in direzione parallela al flusso di elettroni nel canale.

Secondo Yazdani e colleghi, le particelle di Majorana osservate in questo particolare dispositivo sperimentale sono molto resistenti alle alte temperature e alle imperfezioni del materiale. Queste proprietà le rendono candidate molto interessanti per esempio per rendere più stabili i qubit, le unità di informazione dei computer quantistici.

Matteo Serra

BIOLOGIA

Vado al massimo

Il metabolismo ha un limite anche per sforzi prolungati

Joshua Rainey Photography/Shutterstock

Per sforzi di poche ore, una persona può usare cinque volte più energia di quella che consuma a riposo (il tasso metabolico basale), e certi atleti arrivano a 15 volte di più. Ma se lo sforzo si prolunga, l'intensità massima di energia che il corpo umano riesce a sfruttare via via diminuisce. Fino a un tetto invalicabile: anche l'atleta più allenato – che corra o pedali o scali le montagne, con il caldo o nel gelo – riesce a sostenere per un tempo indefinito un consumo energetico non superiore a 2,5 volte il proprio tasso metabolico basale. Lo mostra su «Science Advances» Herman Pontzer, della Duke University di Durham in North Carolina.

Pontzer ha studiato i partecipanti a un'ultramaratona che in 14-20 settimane percorrono quasi 5000 chilometri. Dando loro acqua marcata con isotopi radioattivi e rilevandone l'escrezione, ha misurato la produzione di anidride carbonica, indice dell'energia consumata. Ha inoltre analizzato i dati di studi metabolici su ciclisti, maratoneti, esploratori artici e altri atleti. In tutti, dopo i primi giorni, il consumo energetico cala per fermarsi infine al tetto indicato. Anche la gravidanza assorbe circa 2,2 volte l'energia a riposo, quindi sotto questo aspetto è come una maratona di alcuni mesi.

Il limite non pare dipendere dal metabolismo energetico cellulare, dalla richiesta di ossigeno e nutrienti o dalla dispersione del calore, dato che non cambia con le masse muscolari impegnate, le condizioni ambientali o i tipi di sforzo. Piuttosto, secondo Pontzer, il limite sta nella capacità del tubo digerente di assorbire calorie dal cibo: per tempi brevi il corpo dà fondo alle riserve, ma sul lungo termine non può spendere più di quel che assorbe, e vari studi indicano che la massima quantità di energia ricavabile dal cibo corrisponde a circa 2,4 volte il tasso metabolico basale.

Giovanni Sabato

Curare allergie alimentari con la flora batterica

Immunoterapia contro batterioterapia, qual è il futuro della lotta alle allergie alimentari? L'approccio immunologico prevede di desensibilizzare il sistema immunitario con piccole ma crescenti dosi dell'allergene. I batteri sono la novità, e pare siano anche promettenti secondo uno studio pubblicato su «Nature Medicine» da Talal Chatila dell'Harvard Medical School di Boston e colleghi. Dopo aver prelevato il microbiota intestinale dalle feci di 56 neonati con allergie e 98 controlli, Chatila e colleghi lo hanno «trapiantato» in topi allergici all'albume. Come risultato hanno osservato che solo i batteri dei neonati sani hanno protetto gli animali dallo scatenarsi di reazioni allergiche.

Ad avere un effetto protettivo sono specie batteriche dei generi *Bacteroides* e *Clostridium* che non solo scongiurano l'insorgere delle allergie ma sopprimono le reazioni immunitarie in topi già sensibili all'albume calmando la risposta dei linfociti T regolatori al contatto con l'allergene. Ora si aspetta di confermare i risultati sugli esseri umani. Al Boston Children's Hospital, tuttavia, è in corso un trial clinico per testare la sicurezza del trapianto fecale in soggetti allergici alle nocciole. I ricercatori sono pronti a scommettere che formule di probiotici anti-allergie saranno sul mercato tra cinque anni.

Martina Saporiti

Pubblicazione a norma della Legge 5 Agosto 1981 n. 416 e successive modificazioni

A. MANZONI & C. S.p.A.

Sede Legale Via Nervesa, 21 - 20139 Milano

Capitale Sociale Euro 21.933.535,00 i.v. - Partita Iva/Codice Fiscale/Iscrizione nel Registro delle Imprese di Milano MonzaBrianza Lodi n° 04705810150
REA di Milano n° 1031852 Direzione e Coordinamento Gedi Gruppo Editoriale S.p.A.

BILANCIO REDATTO IN BASE AI PRINCIPI CONTABILI INTERNAZIONALI IAS/IFRS AI SENSI DEL D.LGS. 38 DEL 28 FEBBRAIO 2005

SITUAZIONE PATRIMONIALE - FINANZIARIA

ATTIVO (euro)	**31 dicembre 2017** rideterminato (*)	**31 dicembre 2018**
Attività immateriali a vita indefinita	-	-
Altre immobilizzazioni immateriali	463.606	385.831
Immobilizzazioni immateriali	463.606	385.831
Immobilizzazioni materiali	1.276.639	1.426.094
Altre partecipazioni	-	-
Crediti non correnti	43.024	48.912
Attività per imposte anticipate	3.715.090	3.761.067
ATTIVITÀ NON CORRENTI	**5.498.359**	**5.621.904**
Rimanenze	-	-
Crediti commerciali	182.301.492	166.841.179
Titoli e altre attività finanziarie	957.749	1.849.539
Crediti tributari	1.626.647	1.831.429
Altri crediti	5.839.807	3.722.276
Disponibilità liquide	44.314.983	50.998.881
ATTIVITÀ CORRENTI	**235.040.678**	**225.243.304**
TOTALE ATTIVO	**240.539.037**	**230.865.208**

PASSIVO (euro)	**31 dicembre 2017** rideterminato (*)	**31 dicembre 2018**
Capitale sociale	21.933.535	21.933.535
Riserve	8.115.980	7.434.278
Utili (perdite) a nuovo	(8.195.198)	(4.772.581)
Utile (perdita) d'esercizio	3.356.146	941.651
PATRIMONIO NETTO	**25.210.463**	**25.536.883**
Debiti finanziari	1.475.981	375.000
Fondi per rischi ed oneri	1.384.999	1.350.999
TFR e altri fondi per il personale	3.799.047	3.573.481
Passività per imposte differite	77.317	77.317
PASSIVITÀ NON CORRENTI	**6.737.344**	**5.376.797**
Debiti finanziari	77.644.635	78.299.746
Fondi per rischi ed oneri	2.274.980	2.739.023
Debiti commerciali	121.036.622	112.904.897
Debiti tributari	1.787.196	1.172.796
Altri debiti	5.847.797	4.835.066
PASSIVITÀ CORRENTI	**208.591.230**	**199.951.528**
TOTALE PASSIVITÀ	**215.328.574**	**205.328.325**
TOTALE PASSIVITÀ E PATRIMONIO NETTO	**240.539.037**	**230.865.208**

(*) Rispetto al Bilancio al 31/12/2017 è stata riclassificata la componente riferibile alla porzione di prezzo differito del portafoglio crediti ceduto nell'ambito dell'operazione di cartolarizzazione, precedentemente iscritta alla voce "Crediti e altre attività finanziarie" tra i "Debiti finanziari".

CONTO ECONOMICO COMPLESSIVO

(euro)	**Anno 2017** rideterminato (**)	**Anno 2018**
Ricavi	65.405.502	69.152.659
Altri proventi operativi	1.233.505	1.059.371
Costi per acquisti	(89.028)	(116.930)
Costi per servizi	(40.139.794)	(41.898.086)
Costi per il personale	(20.193.798)	(22.461.844)
Altri oneri operativi	(1.936.582)	(2.942.717)
Ammortamenti e svalutazioni	(246.005)	(546.410)
Risultato operativo	**4.033.800**	**2.246.042**
Proventi/(Oneri) finanziari netti	(626.698)	(1.142.361)
Risultato ante imposte	**3.407.103**	**1.103.681**
Imposte	(50.957)	(162.030)
RISULTATO NETTO	**3.356.146**	**941.651**
Altre componenti del conto economico complessivo, al netto degli effetti fiscali	**(37.480)**	**66.471**
TOTALE CONTO ECONOMICO COMPLESSIVO	**3.318.666**	**1.008.122**

(**) La Società ha adottato l'IFRS 15 per la prima volta dal 1° gennaio 2018. Le informazioni comparative sono state rideterminate secondo le indicazioni introdotte dall' IFRS 15.

ELENCO DELLE TESTATE STAMPA IN ESCLUSIVA ALLA DATA DELLA PRESENTE PUBBLICAZIONE

GEDI Gruppo Editoriale S.p.A.	AFFARI & FINANZA
	D LA REPUBBLICA DELLE DONNE
	IL VENERDì DI REPUBBLICA
	LA REPUBBLICA TUTTO MILANO & LOMBARDIA
	LA REPUBBLICA TROVA ROMA
	NATIONAL GEOGRAPHIC ITALIANO
	L'ESPRESSO
	LE GUIDE DE L'ESPRESSO
	LIMES
	MICROMEGA
	LIVE
Elemedia S.p.A.	CAPITAL MUSIC TIME
Unibeta S.r.l.	IN SELLA
Unimedia S.r.l.	AL VOLANTE
Unilab S.r.l.	CI PIACE CUCINARE!
Le Scienze S.p.A.	LE SCIENZE
	MIND - MENTE & CERVELLO
Ad Local S.r.l.	SHOP IN THE CITY
Il Foglio Quotidiano Soc. Coop.	IL FOGLIO QUOTIDIANO
Symbol S.r.l.	SPIRITO diVINO
	ARBITER
	KAIROS
GEDI News Network S.p.A.	IL MATTINO DI PADOVA
	IL MATTINO DI PADOVA-AFFARI IMMOBILIARI
	LA TRIBUNA DI TREVISO
	LA NUOVA VENEZIA E MESTRE
	IL TIRRENO
	GAZZETTA DI MANTOVA
	NUOVA GAZZETTA DI MODENA
	GAZZETTA DI REGGIO
	LA NUOVA FERRARA
	LA PROVINCIA PAVESE
	LA SENTINELLA DEL CANAVESE
	MESSAGGERO VENETO
	MESSAGGERO DEL LUNEDI'
	IL PICCOLO
	IL PICCOLO DEL LUNEDI'
	CORRIERE DELLE ALPI
	LA STAMPA
	IL SECOLO XIX
	L'AVVISATORE MARITTIMO
	L'AUTOMAZIONE NAVALE TECNOLOGIE (TTM)
	GIOVANICALCIATORI DE IL SECOLO XIX
ST Pauls International S.r.l.	GAZZETTA D'ALBA
Effe Editore S.r.l .	METRO BEACH
	METRO SUMMER
	METRO MAG
	METRO DIARIO
	METRO SOUND
	METRO RUN
	METRO SNOW
	METRO STADIO
FCA Sepin SCPA	ILLUSTRATO
	ILLUSTRATO CNH IND.
Press Italia S.r.l.	CUCINA A SUD
Citypress Società Cooperativa Srl	METROPOLIS

RISCALDAMENTO GLOBALE

Climatizzatori contro il clima

Questi apparecchi fanno impennare i consumi di energia

hxdbzxy/Shutterstock

Ad accendere i riflettori sul problema era stata lo scorso anno l'Agenzia internazionale dell'energia, dedicando un intero dossier alla climatizzazione: la sempre più frequente necessità di rinfrescare gli edifici, imposta dal cambiamento climatico, sta facendo impennare i consumi energetici mondiali.

Ora, uno studio pubblicato su «Nature Communications», il cui primo autore è Bas van Ruijven dell'International Institute for Applied Systems Analysis di Laxenburg, in Austria, prova a quantificare per la prima volta le conseguenze energetiche globali della febbre planetaria. I ricercatori hanno combinato 21 modelli climatici con cinque scenari al 2050 di crescita demografica ed economica. Nel caso in cui nei prossimi trent'anni il riscaldamento si rivelasse particolarmente intenso, la domanda di energia aumenterà di una percentuale compresa tra il 25 e il 58. Qualora l'aumento delle temperature fosse più modesto, l'incremento sarà contenuto tra l'11 e il 27 per cento. L'ampiezza degli intervalli riflette la differente esposizione delle nazioni al cambiamento climatico: la domanda sarà più alta nei paesi tropicali e in quelli delle medie latitudini, nei quali si registreranno nei prossimi trent'anni fino a 75 giornate in più con temperature medie giornaliere sopra i 27,5 °C. Viceversa, nelle regioni più fredde si assisterà alla riduzione dei consumi energetici poiché il clima invernale più mite farà diminuire la richiesta di elettricità e combustibili per riscaldare gli ambienti.

L'effettiva entità della domanda rimane tuttavia incerta. Molto dipenderà dalle future emissioni di gas serra, dal modo in cui i modelli usano le informazioni per proiettare gli estremi climatici e dal modo in cui il consumo energetico dei paesi varia a seconda dei differenti scenari di crescita della popolazione e del reddito.

Davide Michielin

Il cambiamento climatico e l'agricoltura intelligente

Per mitigare il riscaldamento globale occorrerà agire anche sull'uso del suolo, che oggi è responsabile del 25 per cento delle emissioni di gas serra. E l'agricoltura è importante anche per raggiungere altri obiettivi dell'Agenda 2030 sullo sviluppo sostenibile, sottoscritta dai 193 paesi membri delle Nazioni Unite. Così si sono sviluppate «tecniche» di *climate-smart agriculture*: sperimentazione di specie resistenti alle siccità e nuove pratiche agricole per mitigare, adattarsi e contribuire alla sicurezza alimentare. Ma agire così su questi fronti non potrebbe avere conseguenze negative per altri obiettivi?
Se lo sono chiesto Jon Hellin ed Eleanor Fisher in un articolo pubblicato su «Nature Climate Change». Ebbene, se queste azioni non sono effettuate tenendo presenti le condizioni peculiari dei paesi poveri, tutto ciò può aggravarvi le condizioni di povertà e disuguaglianza, anche di genere. I ricercatori esplorano varie opzioni per risolvere questi problemi: intensificazione e diversificazione agricola, forme di micro-assicurazione e di protezione sociale e così via. In breve, le azioni di climate-smart agriculture richiedono un'estrema attenzione alla situazione e alle aspirazioni delle popolazioni indigene.
Vanno evitate forme di cieca esportazione di un certo modello di sviluppo.

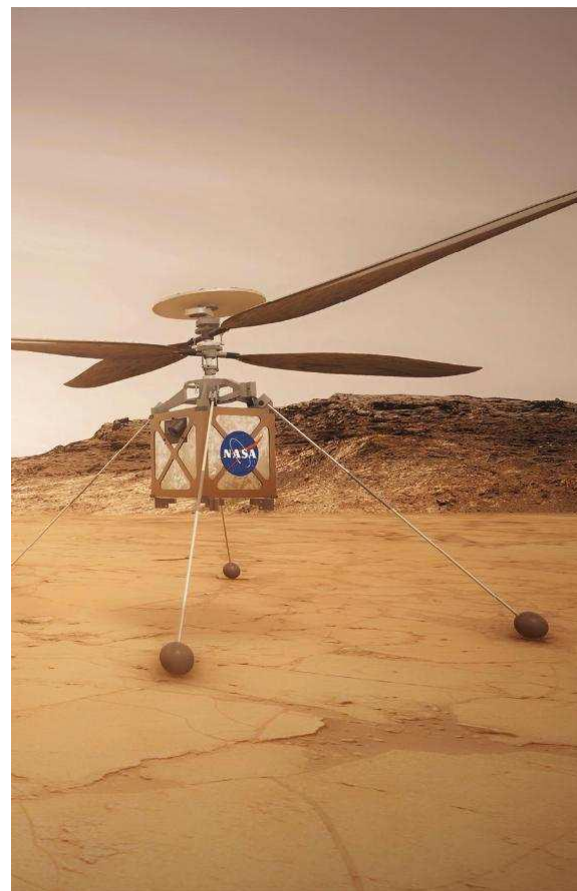
Antonello Pasini

Il batterio atletico che aumenta la resistenza

Gli atleti hanno microbi intestinali peculiari, ma non è chiaro se questo sia solo una conseguenza del loro stile di vita oppure ne favorisca le prestazioni. Aleksandar Kostic, del Joslin Diabetes Center di Boston, e colleghi mostrano su «Nature Medicine» che almeno un batterio tipico degli sportivi potrebbe accrescerne la resistenza.
Analizzando le feci di un centinaio di maratoneti e altri atleti, i ricercatori vi hanno trovato una particolare abbondanza di batteri del genere *Veillonella*, il cui numero aumentava ulteriormente dopo gare oppure allenamenti. E un ceppo di *Veillonella* trapiantato nell'intestino dei topi accresceva del 13 per cento la loro resistenza in una prova di sforzo. Come mai? Questi batteri consumano il lattato (la forma ionizzata dell'acido lattico) prodotto dai muscoli sotto sforzo, ma questo di per sé non aiuterebbe le prestazioni. Kostic ha scoperto però che *Veillonella* trasforma il lattato in propionato, un acido grasso utilizzabile dal corpo come fonte di energia, e che ha effetti antinfiammatori. Anche introducendo propionato nell'intestino dei topi, infatti, la loro resistenza aumenta. L'ipotesi quindi – se lo stesso accade negli esseri umani – è che si inneschi un circolo virtuoso: l'abbondante acido lattico prodotto sotto sforzo fa proliferare la Veillonella, che rende più prestanti gli atleti. (*GiSa*)

Esplorare il Pianeta Rosso grazie a un elicottero

Finora l'esplorazione di Marte è stata condotta da satellite o con *rover* dotati di ruote per spostarsi a contatto con il suolo. Mai con droni, il cui volo è virtualmente impossibile nella tenue atmosfera marziana, con una densità pari all'uno per cento di quella terrestre. Ora, però, al Jet Propulsion Laboratory della NASA a Pasadena, in California, sta nascendo il Mars Helicopter, il primo mezzo in grado di volare su un corpo celeste diverso dalla Terra. Si tratta di un drone con un rotore a doppia elica, composto da più di 1500 elementi in fibra di carbonio, alluminio spaziale, silicio, rame, stagno e aerogel, un materiale estremamente leggero e poroso ottenuto dalla combinazione di un polimero con un solvente.

Il Mars Helicopter pesa 1,8 chilogrammi e ha completato i test di compatibilità con il rover Mars 2020, che lo porterà a destinazione. L'elicottero pensato per Marte ha superato anche le prove di resistenza alle vibrazioni della fase di lancio e alle fredde temperature, fino a -129 gradi Celsius, che sperimenterà nel corso della missione. Il drone marziano sarà pilotato a distanza dalla Terra e invierà immagini riprese da una telecamera. Arrivo previsto: 18 febbraio 2021 nel cratere Jezero. Obiettivo: determinare l'abitabilità degli ambienti esplorati. (*RiOl*)

Anche le scimmie cappuccine hanno un'età della pietra

Uno studio pubblicato su «Nature Ecology & Evolution» da un gruppo anglo-brasiliano coordinato da Michael Haslam dell'Università di Oxford suggerisce che le scimmie cappuccine del nord del Brasile (*Sapajus libidinosus*) stiano attraversando la loro «età della pietra». Che molte scimmie abbiano capacità «tecnologiche» acquisite e tramandate di generazione in generazione anche da migliaia di anni non è una sorpresa. La novità in questo caso è aver individuato per la prima volta cambiamenti nella storia delle tecniche usate da questi primati per aprire le noci di cui si nutrono.
In genere lo fanno battendo una pietra più piccola (il martello) su una noce poggiata in un incavo di un'altra pietra più grande e piatta (l'incudine). Grazie ad analisi impiegate di norma nello studio dell'archeologia umana, i ricercatori hanno dimostrato che i dettagli specifici della metodologia sono cambiati con il tempo e le condizioni ambientali. Ci sarebbero state diverse epoche, almeno quattro, caratterizzate da processi diversi. Lo studio da solo non può sostenere con certezza che in questi primati vi sia un'evoluzione culturale come invece si osserva negli esseri umani, ma di sicuro è un nuovo significativo capitolo di una disciplina nascente, l'archeologia dei primati. (*FeSg*)

Cortesia NASA/JPL-Caltech (*Mars Helicopter*); Tiago Falótico/Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0 (*Sapajus libidinosus*)

C'è del sale nell'oceano sotterraneo di Europa

Da tempo gli astronomi ipotizzano che sotto la crosta ghiacciata di Europa, uno dei satelliti naturali di Giove, si trovi un vasto oceano di acqua allo stato liquido, le cui condizioni fisiche e chimiche potrebbero renderlo adatto ad accogliere forme di vita. Ancora non è possibile indagare direttamente questo oceano, ma i ricercatori si aspettano che la sua composizione si rifletta in quella della giovane superficie del satellite, la più liscia di tutto il sistema solare. Ora, un articolo pubblicato su «Science Advances» ipotizza che una particolare zona della superficie di Europa, denominata Tara Regio, possa essere ricca di cloruro di sodio, il comune sale da cucina. La presenza di questo sale nell'oceano sotterraneo lo renderebbe molto più simile agli oceani terrestri rispetto a quanto ipotizzato finora.

La scoperta, opera di un gruppo di ricerca guidato da Samantha Trumbo, del California Institute of Technology di Pasadena, è frutto della combinazione di osservazioni effettuate con il telescopio spaziale Hubble e di analisi spettroscopiche svolte in laboratorio, orientate a determinare proprio l'«impronta spettrale» del sale da cucina. Il risultato rende Europa ancora più promettente nella ricerca di eventuali forme di vita extraterrestre. (*EmRi*)

Un innesco geologico per l'esplosione del Cambriano

Che cosa provocò l'esplosione del Cambriano, ovvero la repentina comparsa, mezzo miliardo di anni fa, di molti nuovi organismi? Se lo chiese Charles Darwin, senza trovare una risposta, e ancora oggi è uno dei grandi misteri della storia della vita. Tra le varie ipotesi, la più accreditata tira in ballo un aumento dei livelli di ossigeno, senza però indicarne l'origine. Ora uno studio basato su un sofisticato modello biogeochimico e pubblicato su «Nature Communications» fa luce su quel lontano e spettacolare evento.

Secondo Joshua J. Williams, dell'Università di Exeter, e colleghi, l'ossigenazione fu il risultato di colossali movimenti tettonici a livello globale. Con la formazione del supercontinente Gondwana, le collisioni tra placche continentali e placche oceaniche diedero origine a imponenti catene di vulcani. Enormi quantità di anidride carbonica immesse in atmosfera dall'intensa attività vulcanica innalzarono la temperatura della Terra, accelerando l'erosione delle rocce continentali e fertilizzando gli oceani con il fosforo in esse contenuto. Alghe unicellulari e batteri fotosintetici incrementarono così la produzione di ossigeno, che raggiunse un quarto del livello attuale, favorendo un'incredibile impennata di biodiversità. (*EuMe*)

L'incidenza dei disturbi mentali nei paesi in guerra

L'allarme è chiaro: servono investimenti per potenziare e sostenere in maniera continuativa i servizi di salute mentale nei paesi in guerra.
Lo chiarisce un rapporto dell'Organizzazione mondiale della sanità pubblicato su «The Lancet». Il rapporto ha confrontato i risultati di 129 ricerche pubblicate fra il 1980 e il 2017, riguardanti 39 paesi (escludendo i dati su disastri naturali o emergenze sanitarie). Queste stime denunciano l'effetto devastante delle guerre sulla salute mentale. Il 22 per cento, una persona su cinque, dei residenti in zone di conflitto, soffre di vari disturbi di natura psichica; un dato enorme se confrontato con il sette per cento del resto della popolazione.
In generale l'incidenza dei disturbi lievi è quella più alta, il 13 per cento, mentre per quelli moderati e gravi è rispettivamente del 4 e 5 per cento.
Lo studio suggerisce che finora il problema è stato sottostimato e che, nonostante i limiti nel recuperare dati sanitari affidabili e confrontabili in queste situazioni di conflitto, è necessario continuare questo sforzo fondamentale per pianificare interventi sanitari adeguati. (*FeSg*)

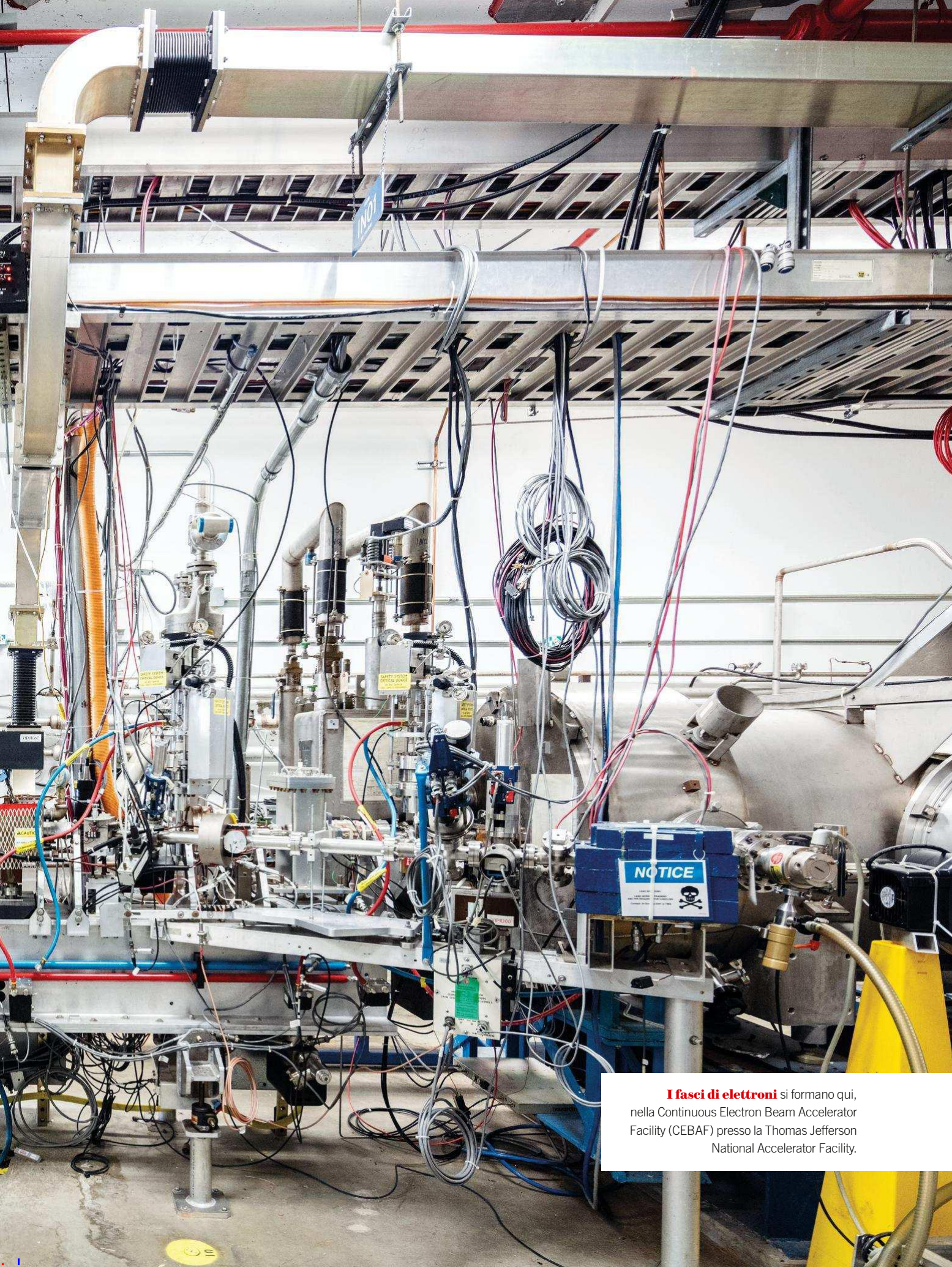
anasalhajj/Shutterstock

In Australia vive un fungo che cattura molecole d'oro

Segui il fungo e troverai l'oro. La speranza è questa, se non altro per riuscire a scovare nuovi giacimenti auriferi in modo più rispettoso dell'ambiente. L'idea viene da una ricerca pubblicata su «Nature Communications», con primo autore Mike Verrall dell'australiana Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO).
Nella miniera di Boddington, nel sud-ovest dell'Australia, una delle dieci miniere più grandi al mondo, Verrall e colleghi hanno scoperto che *Fusarium oxysporum*, un fungo dal colore rosa e dalle ife lunghe come tralicci, e che attacca molte piante di interesse commerciale, cattura l'oro disperso nel sottosuolo e lo ossida per poi farselo precipitare addosso (chimicamente parlando) sotto forma di nanoparticelle. Perché lo faccia non si sa, tuttavia pare gli sia utile: i funghi «indorati» sono più grandi e si riproducono più velocemente rispetto agli altri. Inoltre, nelle zone in cui *Fusarium oxysporum* partecipa al ciclo dell'oro il suolo ha una maggiore biodiversità.
L'insolita attività del fungo potrebbe tornare utile non solo per individuare giacimenti auriferi sotterranei, ma anche per recuperare questo metallo prezioso che si trova nei dispositivi elettronici esausti, un altro buon motivo per continuare a indagare sulla biologia di questo insolito cercatore d'oro. (*MaSa*)

Nelle profondità dell'atomo

Da dove derivano massa e spin di protoni e neutroni? Sorprendentemente, non lo sappiamo. Un nuovo esperimento permetterà di sbirciare all'interno di queste particelle per trovare le risposte

di Abhay Deshpande e Rikutaro Yoshida

I fasci di elettroni si formano qui, nella Continuous Electron Beam Accelerator Facility (CEBAF) presso la Thomas Jefferson National Accelerator Facility.

Abhay Deshpande è professore di fisica alla Stony Brook University e direttore e fondatore del Center for Frontiers in Nuclear Science, che ha come obiettivo lo sviluppo scientifico e la promozione dell'Electron-Ion Collider (EIC).

Rikutaro Yoshida è *principal investigator* alla Thomas Jefferson National Accelerator Facility. È anche direttore dell'EIC Center del laboratorio, che contribuisce a promuovere il programma scientifico del futuro esperimento.

i stima che l'universo osservabile contenga circa 10^{53} chilogrammi di materia ordinaria e la maggior parte di questa massa è formata da circa 10^{80} protoni e neutroni (che, insieme agli elettroni, compongono gli atomi). Ma cos'è che dà ai protoni e ai neutroni la loro massa?

La risposta è tutt'altro che semplice. Protoni e neutroni sono costituiti da particelle chiamate quark e da particelle leganti dette gluoni. I gluoni sono privi di massa, mentre la somma delle masse dei quark all'interno di protoni e neutroni (detti collettivamente «nucleoni») costituisce circa il 2 per cento della massa totale dei nucleoni. Da dove viene il resto, allora?

E non è l'unico mistero di questi componenti atomici fondamentali. Lo spin dei nucleoni è altrettanto inspiegabile: non è derivabile in termini dello spin dei quark al loro interno. Oggi gli scienziati ritengono che spin, massa e altre proprietà dei nucleoni derivino dalle complesse interazioni tra quark e gluoni al loro interno, ma come questo accada di preciso ci sfugge. Attualmente la teoria non può dirci più di tanto, perché le interazioni di quark e gluoni sono descritte da una teoria, la cromodinamica quantistica (QCD), in cui è diabolicamente difficile svolgere i calcoli.

Per progredire ci servono nuovi dati sperimentali, ed è qui che entra in gioco l'Electron-Ion Collider (EIC). A differenza di altri collisori, come il Large Hadron Collider del CERN vicino a Ginevra o il Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) negli Stati Uniti, che fanno collidere particelle composite come protoni e ioni, l'EIC provocherebbe collisioni fra elettroni, che non hanno una struttura interna, e protoni e neutroni, diventando così una specie di microscopio che permetterà per la prima volta di scrutare l'interno di queste particelle.

L'EIC è una delle massime priorità della fisica nucleare statunitense, e dovrebbe essere costruito o presso il Brookhaven National Laboratory, a Long Island, o presso la Thomas Jefferson National Accelerator Facility (Jefferson Lab), a Newport News, in Virginia, due importanti laboratori di fisica negli Stati Uniti. Se sarà approvato, il collisore potrebbe iniziare a registrare dati intorno al 2030; sarà in grado di vedere come spin e massa dei singoli quark e gluoni, nonché l'energia del loro movimento collettivo, si combinano in modo da generare spin e massa di protoni e neutroni. Dovrebbe riuscire a rispondere anche ad altre domande: per esempio se quark e gluoni siano raggruppati o diffusi all'interno dei nucleoni, a che velocità si muovano e quale ruolo svolgano queste interazioni nel tenere i nucleoni uniti tra loro nei nuclei. Le misurazioni dell'EIC porteranno una mole di informazioni sul modo in cui i costituenti di base della materia interagiscono l'uno con l'altro per formare l'universo visibile. Cinquant'anni dopo la scoperta del quark, siamo finalmente in procinto di svelarne i misteri.

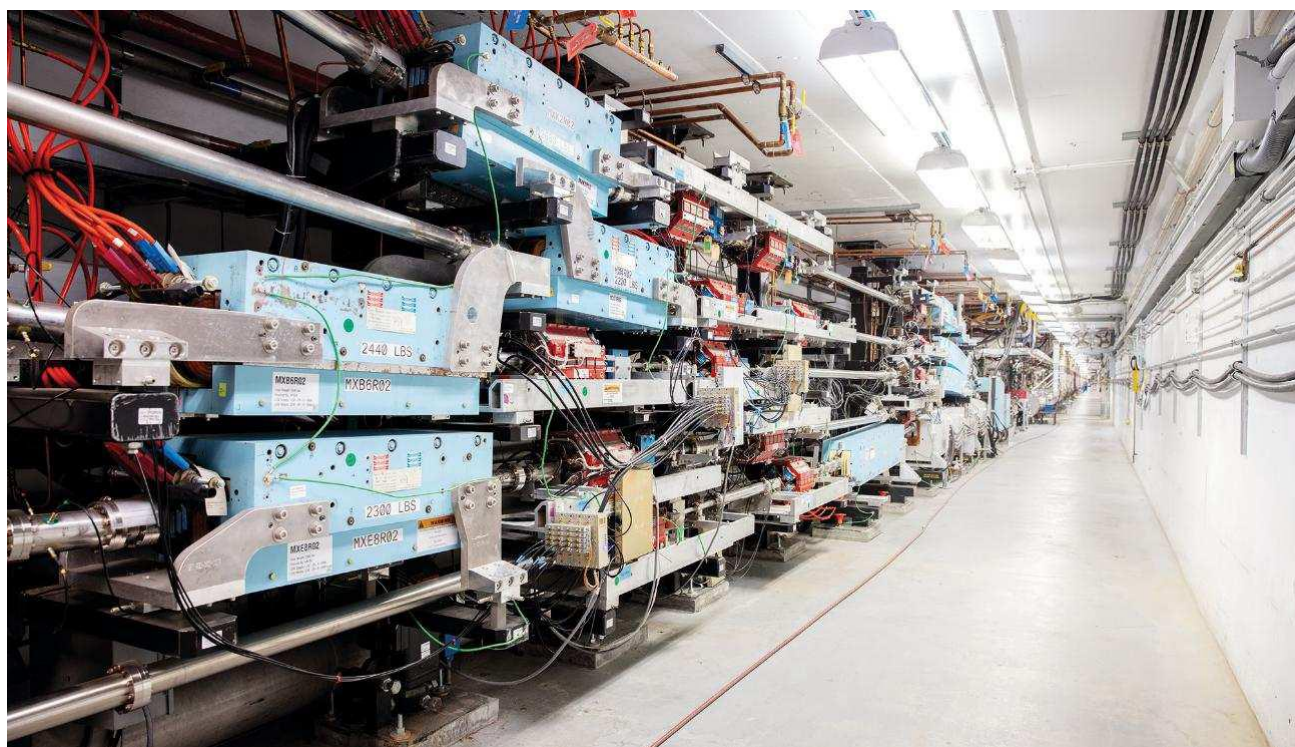
Fenomeni emergenti

Ormai è ragionevolmente chiaro il modo in cui gli oggetti sono composti dagli atomi e quello in cui le loro caratteristiche macroscopiche derivano dalle caratteristiche degli atomi al loro interno, e anzi gran parte della nostra vita moderna dipende da quello che sappiamo su atomi, elettroni ed elettromagnetismo: è que-

IN BREVE

Da dove derivano massa e spin di protoni e neutroni? Sorprendentemente, non possiamo dire di saperlo.

In qualche modo gli ingredienti di queste particelle – quark e gluoni – si combinano in complesse interazioni che producono le proprietà dei protoni e dei neutroni.

Per capire come, i fisici vogliono costruire un collisore di elettroni e ioni che disintegrerà protoni e nuclei atomici usando gli elettroni, in modo da fornire immagini tridimensionali dell'interno dei nuclei.

I magneti di dipolo (*in azzurro*) contribuiscono a dirigere i fasci di elettroni mentre accelerano attorno al circuito della CEBAF.

Fotografie Floto + Warner

sta conoscenza che fa funzionare le nostre automobili e i nostri *smartphone*. Ma allora perché non capiamo come i nucleoni siano composti da quark e gluoni? Prima di tutto, i quark sono almeno 10.000 volte più piccoli di un protone, quindi non c'è un modo semplice per studiarli. Inoltre le caratteristiche dei nucleoni derivano dal comportamento collettivo di quark e gluoni: sono, di fatto, fenomeni emergenti, il risultato di molti agenti complessi le cui interazioni sono troppo elaborate per permetterci oggi di comprenderle appieno.

La teoria che descrive queste interazioni, la cromodinamica quantistica, fu sviluppata tra la fine degli anni sessanta e l'inizio degli anni settanta, e fa parte della teoria generale della fisica delle particelle chiamata modello standard, che descrive le forze conosciute dell'universo (tranne la gravità). La forza elettromagnetica tra particelle elettricamente cariche ha come mediatori i fotoni, le particelle della luce; analogamente, ci dice la QCD, l'interazione forte – la forza che tiene insieme i nucleoni – è mediata dai gluoni. Il corrispondente della carica coinvolto nell'interazione forte è detto «colore» (da cui «cromodinamica»). I quark portano la carica di colore e interagiscono tra loro scambiandosi i gluoni, ma a differenza dell'elettromagnetismo, in cui i fotoni stessi non hanno carica elettrica, qui anche i gluoni sono dotati di carica di colore. Quindi i gluoni interagiscono con altri gluoni scambiandosi ulteriori gluoni, e questa differenza ha conseguenze profonde. Questo circuito di interazioni è il motivo per cui la QCD è spesso troppo complicata da calcolare.

La QCD differisce da altre teorie più familiari anche perché l'interazione forte diventa meno intensa via via che i quark si avvicinano (nell'elettromagnetismo è vero l'opposto, e la forza si indebolisce all'allontanarsi delle particelle cariche). A distanze abbastanza ridotte all'interno del nucleone, i quark sono sottoposti a una forza così lieve che si comportano come se fossero liberi. Grazie alla scoperta di questa strana conseguenza della QCD i fisici David Gross, H. David Politzer e Frank Wilczek hanno ricevuto nel 2004 il premio Nobel per la fisica. Quando i quark si allontanano l'uno dall'altro, la forza tra di loro cresce rapidamente e diventa così intensa che i quark finiscono «confinati» all'interno del nucleone: è il motivo per cui non troveremo mai un quark o un gluone da solo al di fuori di un protone o un neutrone. È possibile calcolare le interazioni della QCD purché i quark siano vicini e interagiscano debolmente l'uno con l'altro; quando sono più distanti, invece, a distanze vicine al raggio del protone, la forza diventa troppo intensa e la teoria diventa troppo complessa per essere utile.

Per capire ulteriormente il funzionamento quantistico dell'interazione forte abbiamo bisogno di più informazioni. Quello che sappiamo dei fenomeni atomici, per esempio, non è venuto solo dallo studio degli atomi e delle loro interazioni, ma anche dallo studio dei fenomeni emergenti che appaiono al di sopra di questi blocchi costitutivi fondamentali. Non sarebbe stato possibile costruire la biologia molecolare dalla sola conoscenza dei suoi fondamenti, gli atomi e l'elettromagnetismo; il momento «eureka» è giunto quando è stata scoperta la struttura a doppia elica del DNA. Quello che ci serve per progredire nel mondo dei quark e dei gluoni è guardare all'interno del nucleo.

«Vedere» gli atomi

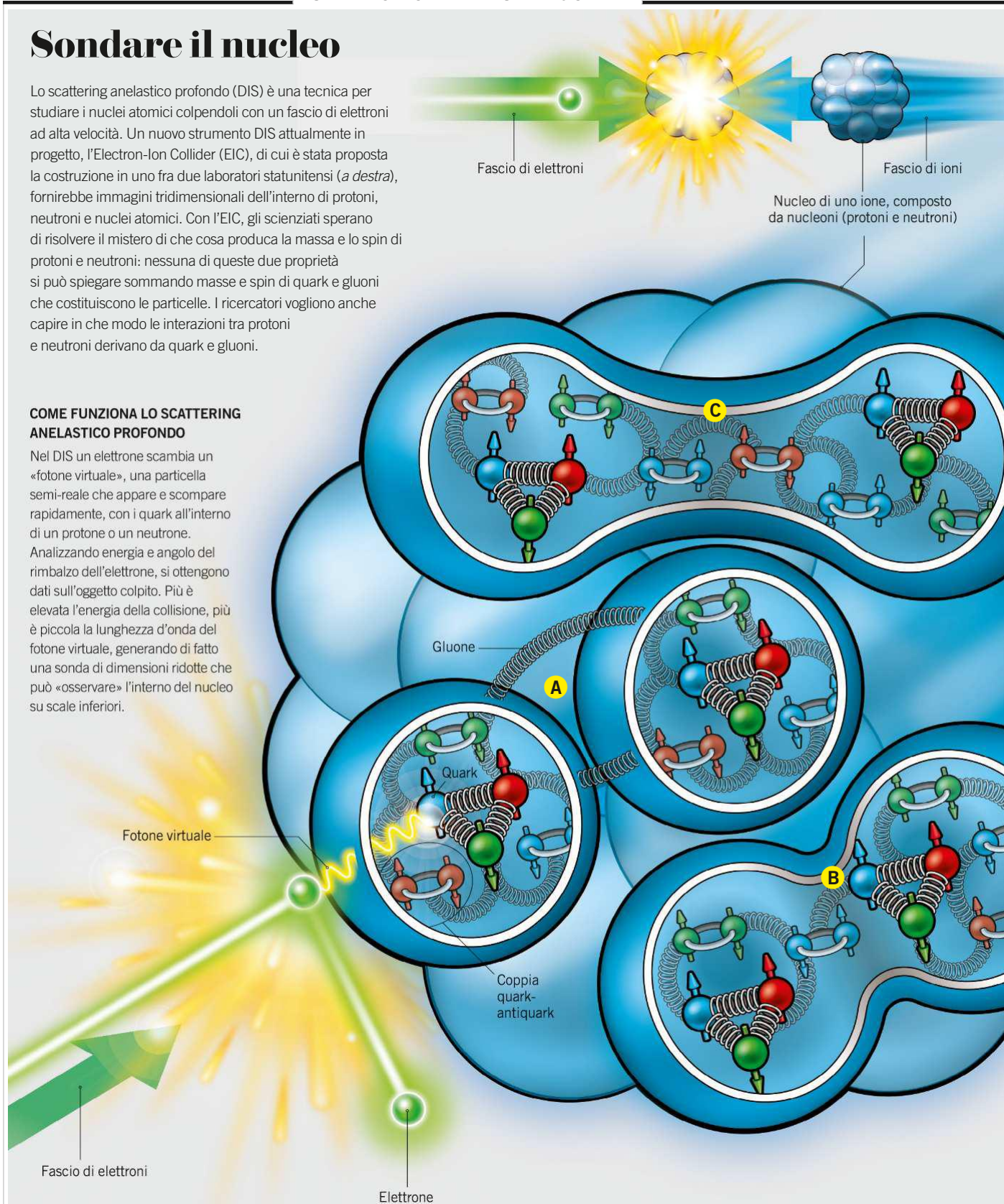
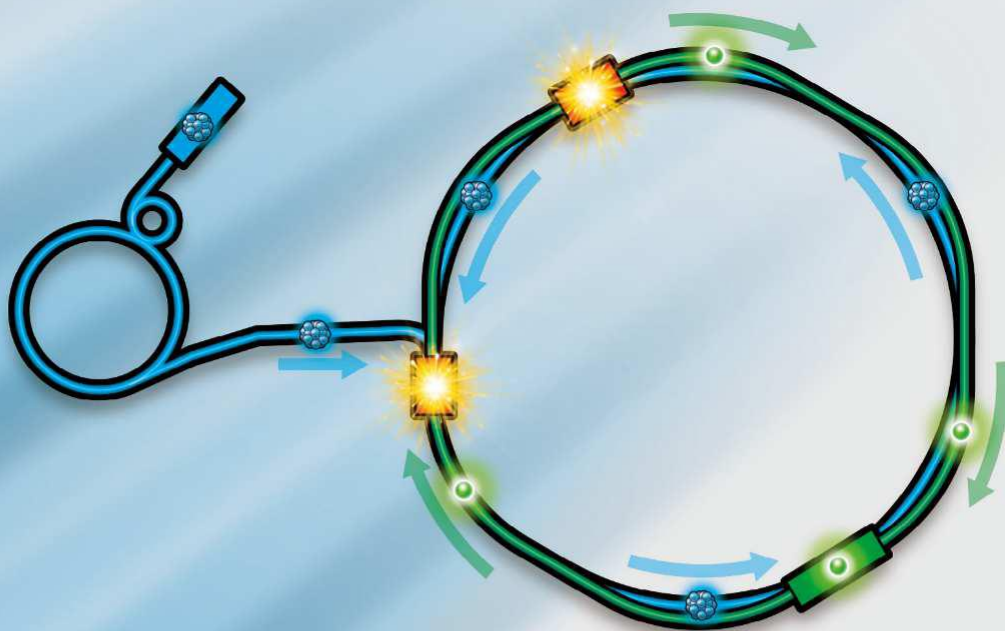
Nella prima parte del XX secolo i fisici scoprirono come «vedere» gli atomi attraverso un processo chiamato diffrazione ai raggi X. Puntando un fascio di raggi X su un campione e studiando lo schema di interferenza che risulta quando i raggi attraversano il materiale, è possibile vedere la struttura cristallina degli atomi del materiale. Il motivo per cui questa tecnologia funziona è che

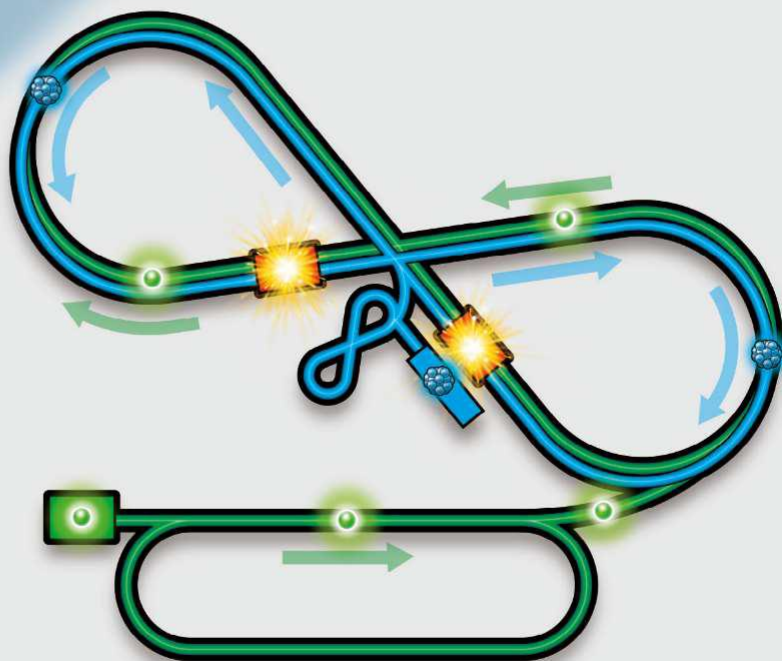
continua a p. 34

Sondare il nucleo

Lo scattering anelastico profondo (DIS) è una tecnica per studiare i nuclei atomici colpendoli con un fascio di elettroni ad alta velocità. Un nuovo strumento DIS attualmente in progetto, l'Electron-Ion Collider (EIC), di cui è stata proposta la costruzione in uno fra due laboratori statunitensi (*a destra*), fornirebbe immagini tridimensionali dell'interno di protoni, neutroni e nuclei atomici. Con l'EIC, gli scienziati sperano di risolvere il mistero di che cosa produca la massa e lo spin di protoni e neutroni: nessuna di queste due proprietà si può spiegare sommando masse e spin di quark e gluoni che costituiscono le particelle. I ricercatori vogliono anche capire in che modo le interazioni tra protoni e neutroni derivano da quark e gluoni.

COME FUNZIONA LO SCATTERING ANELASTICO PROFONDO

Nel DIS un elettrone scambia un «fotone virtuale», una particella semi-reale che appare e scompare rapidamente, con i quark all'interno di un protone o un neutrone. Analizzando energia e angolo del rimbalzo dell'elettrone, si ottengono dati sull'oggetto colpito. Più è elevata l'energia della collisione, più è piccola la lunghezza d'onda del fotone virtuale, generando di fatto una sonda di dimensioni ridotte che può «osservare» l'interno del nucleo su scale inferiori.

IPOTESI DI STRUTTURA A BROOKHAVEN
Un progetto prevede di costruire l'EIC al Brookhaven Lab di Long Island, usando il Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) a forma di anello, già esistente, che per ora fa collidere protoni e nuclei pesanti. Aggiungendo all'interno della galleria del RHIC un nuovo acceleratore di elettroni, sarebbe possibile far collidere elettroni e ioni in due o tre punti (*mostrati come lampi*) lungo il circuito.

Gli scienziati si chiedono se un protone e un neutrone, per esempio, possano a volte condividere gluoni tra loro (A) o preferiscano formare coppie come in (B) o interagiscano scambiandosi coppie quark-antiquark (C).

IPOTESI DI STRUTTURA AL JEFFERSON LAB
In un'altra opzione si amplierebbe la Continuous Electron Beam Accelerator Facility (CEBAF, *l'anello verde in basso*), un acceleratore di elettroni recentemente migliorato, presso la Thomas Jefferson National Accelerator Facility di Newport News, in Virginia. Il fascio di elettroni sarebbe instradato un «anello» a forma di 8, mentre verrebbe aggiunto un nuovo acceleratore di ioni (*in azzurro*) nella direzione opposta. Le collisioni tra i due fasci si verificherebbero in due punti.

Italia all'avanguardia nell'Electron-Ion Collider

Il numero degli scienziati italiani che lavorano al progetto di questo nuovo collisore è secondo solo a quello degli statunitensi, e coinvolge una dozzina di università pubbliche e l'Istituto nazionale di fisica nucleare

Un risultato che alle Olimpiadi ci farebbe inorgoglire: secondi solo agli Stati Uniti. Questi sono i numeri del coinvolgimento italiano nell'impresa Electron-Ion Collider, descritta nell'articolo di Abhay Deshpande e Rikutaro Yoshida. Per ora l'Electron-Ion Collider, o EIC, è solo un progetto, ma raccoglie già una comunità di più di 850 scienziati, organizzati in un gruppo di lavoro, l'EIC User Group. L'Italia è presente con più di 80 ricercatori e docenti, afferenti a 12 atenei pubblici e all'Istituto nazionale di fisica nucleare (INFN), l'ente pubblico demandato a sostenere la ricerca italiana in fisica nucleare e delle particelle. Solo gli Stati Uniti hanno un numero di partecipanti superiore.

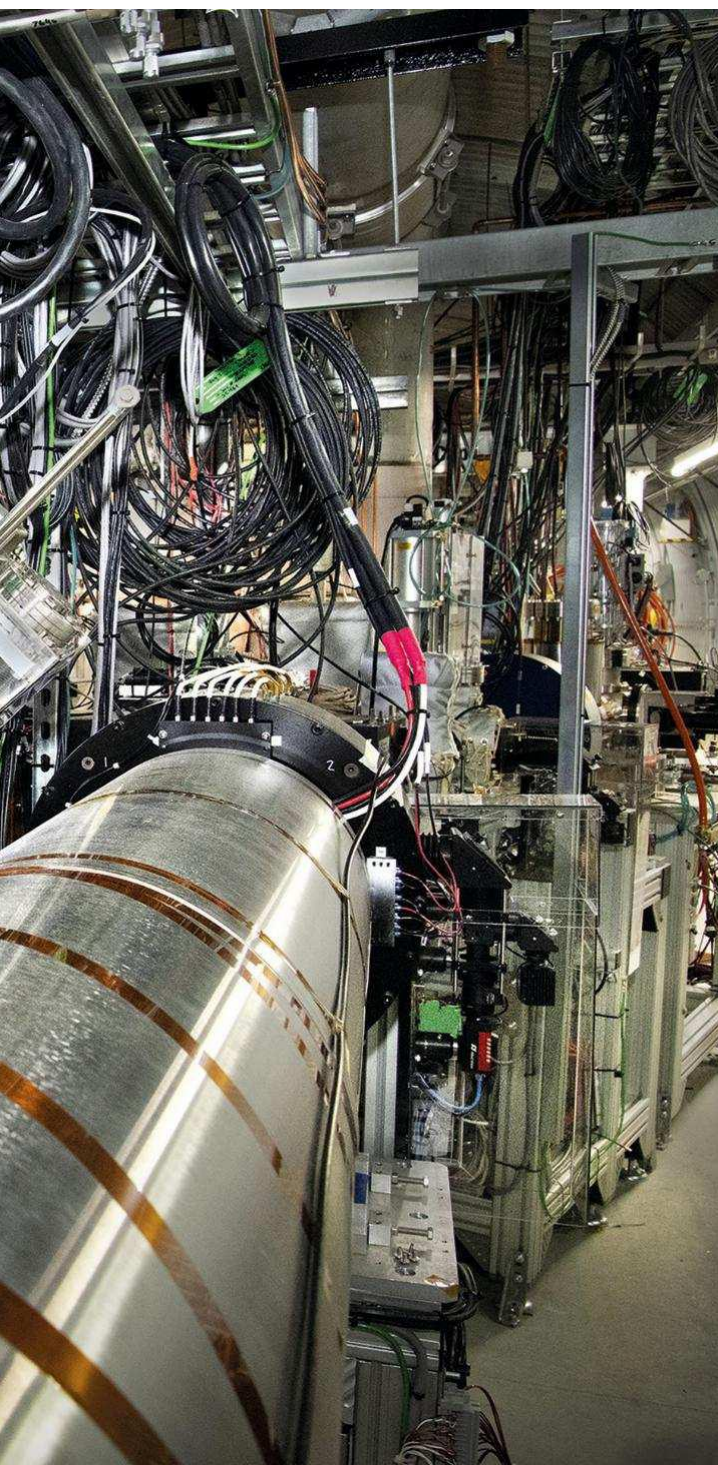
L'EIC potrebbe diventare l'acceleratore di particelle più potente al mondo dopo il Large Hadron Collider del CERN di Ginevra. Sarebbe l'unico acceleratore con questa potenza ad avere la capacità di sondare con altissima precisione la materia nucleare in stati molto ricchi di informazione (in gergo «polarizzati», oppure in condizioni di «saturazione»). Inoltre potrebbe essere l'unico nuovo acceleratore di particelle costruito nel prossimo decennio, e sarà sicuramente il maggior progetto statunitense nel campo della fisica nucleare. L'Italia ha l'interesse, le competenze e la voglia di partecipare con entusiasmo a questa avventura.

Una massima priorità

L'idea di realizzare un collisore di elettroni e ioni per studiare la struttura interna di protoni e neutroni ha radici lontane. L'unico collisore protone-elettrone mai realizzato è stato l'Hadron-Elektron-Ringanlage (HERA), al Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY) di Amburgo, che ha funzionato fino al 2007. Fin dalla fine degli anni novanta sono state avanzate proposte di «polarizzare» gli spin dei protoni circolanti, ovvero di orientarli in modo coerente. Tra il 2005 e il 2010 si è discusso senza successo di realizzare un anello di elettroni polarizzati all'interno del complesso della Facility for Antiproton and Ion Research (FAIR), attualmente in costruzione a Darmstadt, in Germania. Questi auspici della comunità scientifica si stanno ora realizzando, speriamo, con l'EIC, grazie alla forte spinta statunitense e al supporto internazionale che è riuscita a raccogliere.

Negli anni scorsi il gruppo di lavoro ha formulato la proposta di realizzare il collisore, identificando gli obiettivi scientifici che ne giustificano la costruzione. È poi riuscito a convincere tutta la comunità dei fisici nucleari statunitensi, che ha riconosciuto l'EIC come «massima priorità» nel suo ultimo documento di programmazione strategica pluriennale, e la comunità scientifica più ampia, rappresentata dalle National Academies of Sciences, Engineering and Medicine, che di recente hanno pubblicato una valutazione positiva sul progetto con lusinghieri commenti. Ora bisogna convincere il governo federale e il Congresso degli Stati Uniti a finanziare il progetto. Una prima decisione in merito è attesa nei prossimi mesi: sarà l'inizio concreto del progetto, con i primi importanti finanziamenti.

La costruzione dell'EIC dovrebbe iniziare entro i prossimi cinque anni, il funzionamento dovrebbe cominciare nel 2030 e proseguire per anni, aprendo nuove prospettive per un'intera generazione di giovani fisici.

Un ingegnere del Brookhaven National Laboratory lavora alle LEReC, sezioni di raffreddamento per elettroni del Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC). La tecnologia delle LEReC potrebbe essere applicata all'Electron-Ion Collider.

I ricercatori italiani hanno dato e continueranno a dare contributi su molti fronti: innanzitutto, la definizione degli obiettivi generali, ben illustrati nell'articolo di Deshpande e Yoshida. Nel 2011 una dozzina di italiani hanno firmato il primo documento in cui è stato sviluppato il cosiddetto «Science Case» del collisore, cioè la definizione degli aspetti più importanti da investigare per giungere alla comprensione della struttura interna dei nuclei.

In pratica e in teoria

I ricercatori sperimentali italiani porteranno la loro esperienza, fondamentale nel successo di esperimenti nei laboratori DESY in Germania, CERN in Svizzera, Jefferson Lab negli Stati Uniti. Le competenze che saranno inserite nel progetto sono relative sia alle complesse tecniche di analisi (software) necessarie in esperimenti simili sia alla realizzazione di rivelatori con tecnologie all'avanguardia sviluppate in Italia. Il progetto EIC-NET, finanziato dall'INFN, raccoglie gruppi di fisici sperimentali a Torino, Padova, Bologna, Ferrara, Genova, Trieste, Roma, Frascati, Bari e Catania. Per Silvia Dalla Torre, dirigente di ricerca all'INFN, sezione di Trieste, e responsabile di EIC-NET, «il coinvolgimento dei fisici italiani che studiano la struttura del protone è una naturale continuazione di un convinto impegno scientifico. Molti di noi sono attivi in questo campo da anni. Oggi la nostra partecipazione è formalizzata grazie al supporto dell'INFN. Sarà quindi possibile, per i fisici italiani, contribuire in maniera sostanziale a questo progetto di scoperta scientifica».

I ricercatori teorici italiani sono impegnati nello studio della distribuzione tridimensionale dei costituenti interni del protone (quark e gluoni). Da anni sono tra i pionieri a livello mondiale nella ricostruzione di queste mappe tridimensionali. Sono organizzati nel progetto National INitiative on PHysics of hAdrons (NINPHA) dell'INFN, coordinato da Mariaelena Boglione, professore associato all'Università di Torino, e il team comprende i gruppi di Torino, Cagliari, Genova, Roma, Perugia e Pavia. «L'EIC sarà letteralmente una miniera di informazioni, che ci aiuterà a comprendere alcuni tra i più affascinanti misteri della fisica subnucleare, come l'origine della massa e dello spin del protone», ha dichiarato Barbara Pasquini, professore associato all'Università di Pavia.

Nei prossimi anni proseguirà l'attività di ricerca e sviluppo sui rivelatori che verranno usati nell'EIC, mentre è in atto già da anni una proficua collaborazione tra sperimentali e teorici per ottimizzare l'analisi dei dati, testimoniata dalla partecipazione a progetti comuni di ricerca italiani e, soprattutto, europei. Oltre ad avere una fondamentale importanza per la comprensione dei costituenti della materia, l'EIC porterà a risultati utili anche per altri settori della fisica, e a ricadute tecnologiche e applicazioni in campi diversi, tra cui quello medico.

«L'Italia ha dato contributi rilevanti alla fisica nucleare negli Stati Uniti, fin dalla sua nascita per opera di Enrico Fermi. Il coinvolgimento in un grande progetto negli Stati Uniti sarà un'importante occasione per rafforzare la dimensione globale della ricerca scientifica italiana. L'INFN sarà in prima linea», ha detto Eugenio Nappi, vicepresidente dell'INFN.

Alessandro Bacchetta,
professore associato, Università degli Studi di Pavia e INFN – Pavia
Andrea Bressan,
professore associato, Università degli Studi di Trieste e INFN – Trieste, vicepresidente dell'Institutional Board dell'EIC User Group
Marco Radici,
primo ricercatore INFN - Pavia, membro dello Steering Committee e dell'Institutional Board dell'EIC User Group

continua da p. 29
la lunghezza d'onda di un raggio X è simile alle dimensioni di un atomo, dandoci la possibilità di sondare la scala delle distanze atomiche, che sono dell'ordine dei nanometri (10^{-9} metri). Allo stesso modo, i fisici hanno «visto» per la prima volta i quark cinquant'anni fa in un esperimento in cui furono fatti collidere elettroni e protoni nel cosiddetto *scattering* anelastico profondo (DIS).

Con questo metodo, un elettrone rimbalza contro un protone (o un neutrone o un nucleo) e scambia un fotone virtuale; quest'ultimo non è esattamente reale, bensì appare e scompare rapidamente come conseguenza della meccanica quantistica, che governa le interazioni tra le particelle. Misurando attentamente l'energia e l'angolo del diffusione dell'elettrone, otteniamo informazioni su quello che ha colpito.

La lunghezza d'onda del fotone virtuale negli esperimenti DIS è alla scala dei femtometri (10^{-15} metri), l'ordine di grandezza del diametro del protone. Quanto maggiore è l'energia della collisione, tanto minore è la lunghezza d'onda del fotone virtuale; e minore è questa lunghezza d'onda più precisa e localizzata la rilevazione. Se la lunghezza d'onda è sufficientemente piccola, l'elettrone in sostanza rimbalza contro uno dei quark all'interno del protone (anziché sull'intero protone), permettendoci di dare una sbirciatina alla struttura interna della particella.

Il primo esperimento DIS fu il progetto SLAC-MIT, presso quello che allora era lo Stanford Linear Accelerator Center (SLAC), che nel 1968 ottenne la prima prova dell'esistenza di quark, scoperta per cui ai responsabili dell'esperimento fu assegnato nel 1990 il Nobel per la fisica. Esperimenti simili hanno fatto scoprire che i quark all'interno di protoni e neutroni liberi e quelli all'interno dei nuclei si comportano in modo molto diverso e, inoltre, che gli spin del protone e del neutrone non derivano dagli spin dei quark costituenti, come ci si aspettava.

Manipolando quark e gluoni si potrebbe creare una tecnologia un milione di volte più potente della nanotecnologia

Questo risultato, ottenuto prima per i protoni, è stato definito «crisi dello spin del protone». Il primo collisore DIS, in cui sia elettroni che protoni venivano accelerati prima di collidere, fu l'Hadron-Electron Ring Accelerator (HERA) presso il centro di ricerca Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY) di Amburgo, in Germania, che è stato in funzione dal 1992 al 2007. Gli esperimenti con HERA hanno mostrato che quella che si riteneva una semplice configurazione di tre quark all'interno di ciascun protone e neutrone poteva in effetti diventare una «zuppa» di particelle in cui numerosi quark e gluoni compaiono e scompaiono all'istante. HERA ha notevolmente migliorato la nostra comprensione della struttura dei nucleoni, ma non ha risolto la crisi dello spin ed era priva dei fasci di nuclei necessari per studiare il comportamento dei quark e dei gluoni nei nuclei.

Un fattore importante, che complica tutte le osservazioni a questa scala, è la stranezza della meccanica quantistica. Le sue leggi descrivono le particelle subatomiche come nubi di probabilità, non come qualcosa che esiste in stati specifici in luoghi e tempi determinati: dobbiamo pensare ai quark come a qualcosa che esiste in un numero infinito di configurazioni simultaneamente. Bisogna inoltre considerare l'*entanglement*, il fenomeno quantistico per cui due particelle possono connettersi in modo che i loro destini rimangono legati anche dopo che si sono separate. L'entanglement potrebbe rappresentare un problema fondamentale per le osservazioni alla scala dei nuclei, perché i quark e i gluoni che vorremmo osservare rischiano di rimanere *entangled* con quello che usiamo per guardarli: nel caso del DIS, dunque, con il fotone virtuale. Sembra impossibile definire che cosa sia la struttura dei nucleoni se quello che osserviamo dipende dal modo in cui lo osserviamo.

Fortunatamente, negli anni settanta la QCD era progredita a sufficienza da permettere di capire come tenere separati la sonda e il bersaglio negli esperimenti DIS: la cosiddetta fattorizzazione. A energie sufficientemente elevate, è in sostanza possibile ignorare gli effetti dell'entanglement quantistico sotto certi presupposti, sufficienti per descrivere la struttura del protone in una dimensione. Si riusciva quindi a ricavare dagli esperimenti DIS una misura della probabilità che un dato quark in un protone desse un certo contributo alla quantità di moto in avanti.

I progressi teorici più recenti ci hanno permesso di spingerci oltre, e di descrivere la struttura interna dei nucleoni in più di una dimensione: non solo quanto quark e gluoni contribuiscano alla sua quantità di moto in avanti, ma anche quanto si muovano lateralmente all'interno del nucleone.

Il vero passo avanti, però, verrà con l'EIC.

Il collisore elettroni-ioni

Grazie all'EIC avremo la prima mappa tridimensionale dell'interno di un nucleone. Prevediamo che il collisore permetterà di misurare le posizioni e le quantità di moto di quark e gluoni e quanto ognuno contribuisca alla massa e allo spin complessivi del nucleone.

Il principale passo avanti dell'EIC rispetto ai precedenti esperimenti DIS è la sua luminosità: produrrà tra 100 e 1000 volte più collisioni al minuto di HERA, per esempio. Inoltre le alte energie dei fasci in collisione dell'EIC permetteranno di rilevare distanze dell'ordine dei centesimi del diametro di un protone, il che permetterà di esplorare le regioni in cui c'è un gran numero di quark e gluoni, ognuno dei quali trasporta circa lo 0,01 per cento della quantità di moto in avanti del protone. L'EIC ci permetterà anche di controllare l'allineamento dello spin delle particelle nei suoi fasci, per poter studiare come lo spin del protone emerge dalle interazioni QCD di quark e gluoni. Una volta incorporate nell'attuale quadro teorico, le misurazioni dell'EIC ci permetteranno, per la prima volta, di creare una vera immagine tridimensionale del protone in termini di quark e gluoni.

Ci sono molte domande su cui speriamo di fare progressi: per esempio, i costituenti del protone sono distribuiti uniformemente al suo interno o si ammassano insieme? Alcuni contribuiscono più degli altri a massa e spin della particella? E quale ruolo svolgono quark e gluoni nel legare insieme protoni e neutroni nella formazione dei nuclei? Negli esperimenti a livello femtoscopico siamo solo agli inizi delle indagini su questi problemi, e l'EIC sarà la prima macchina che potrà darci le risposte complete.

Una delle più grandi incognite in quello che sappiamo della struttura dei nucleoni è che cosa accada se osserviamo queste particelle con una sonda estremamente piccola a scale molto ridotte, ed è qui che cominciano a succedere cose strane. La QCD prevede che sondando a energie sempre più alte si troveranno sempre più gluoni. I quark possono irradiare gluoni, e questi gluoni a loro volta irradiano ulteriori gluoni, in una reazione a catena. Stranamen-

All'interno del Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) del Brookhaven National Laboratory sono accelerati ioni pesanti e protoni polarizzati.

Brookhaven National Laboratory

te, non è la misurazione a provocare questa radiazione di gluoni, ma le peculiarità della meccanica quantistica, che ci dice che l'interno del protone è diverso – contiene proprio più gluoni – quanto più lo si guarda da vicino.

Sappiamo però che questa non può essere la risposta definitiva, perché significherebbe che la materia cresce illimitatamente, cioè che gli atomi conterrebbero un numero infinito di gluoni se li si andasse a guardare sempre più da vicino. I collisori precedenti, fra cui HERA, hanno trovato indizi di uno stato di «saturazione», in cui il protone non riusciva a ospitare altri gluoni e alcuni iniziavano a ricombinarsi, cancellandosi a vicenda. La saturazione non è mai stata rilevata in modo univoco, e non conosciamo la soglia a cui si verifica. Alcuni calcoli fanno ritenere che la saturazione del gluone formi un nuovo stato della materia: un «condensato di colore» con proprietà straordinarie. Per esempio, la densità di energia dei gluoni può raggiungere valori mai visti, da 50 a 100 volte quella all'interno delle stelle di neutroni. Per raggiungere le regioni con la massima densità gluonica possibile l'EIC userà nuclei pesanti anziché protoni, in modo da rilevare questo affascinante fenomeno e studiarlo in dettaglio.

Costruire l'EIC

I piani per il nuovo collisore hanno ottenuto l'approvazione dal più recente (2015) incontro di pianificazione a lungo raggio della comunità scientifica nucleare statunitense e dal Department of Energy degli Stati Uniti, che nel 2017 ha richiesto una valutazione indipendente dell'EIC da parte delle National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine degli Stati Uniti (NAS). Nel luglio 2018 la commissione delle NAS ha giudicato lo status scientifico dell'EIC fondamentale, convincente e opportuno.

Ci sono due possibili vie per la costruzione di questa macchina. Una consisterebbe nell'ampliare il RHIC a Brookhaven, vicino a New York; questo progetto, chiamato eRHIC, aggiungerebbe un fascio di elettroni all'interno della galleria dell'acceleratore RHIC già esistente e lo farebbe collidere in due punti diversi con uno dei fasci di ioni del RHIC. Un'altra possibilità è usare il fascio di elettroni della Continuous Electron Beam Accelerator Facility (CEBAF) presso il Jefferson Lab; secondo il progetto chiamato Jefferson Lab EIC (JLEIC), il raggio della CEBAF sarebbe instradato in una nuova galleria da costruire accanto.

Ciascuna di queste due macchine ci farebbe compiere enormi passi avanti nella comprensione della QCD e ci permetterebbe finalmente di visualizzare l'interno di nucleoni e nuclei. Ciascuna permetterebbe agli scienziati di affrontare le domande su spin, massa e altre caratteristiche dei nucleoni che attualmente ci lasciano perplessi. E ciascuna avrebbe la potenzialità di far collidere molti tipi di nuclei, compresi quelli pesanti come oro, piombo e uranio, il che ci permetterebbe di studiare come cambia la distribuzione di quark e gluoni quando i loro nucleoni fanno parte di nuclei più grandi.

Vorremmo sapere, per esempio, se alcuni gluoni iniziano a sovrapporsi e a essere «condivisi» da due diversi protoni.

Femtotecnologia?

Nel XXI secolo le dimensioni stesse dell'atomo sono il fattore limitante delle nostre tecnologie. In assenza di scoperte rivoluzionarie, la lunghezza di 10 nanometri (circa 100 diametri atomici) è probabilmente il minimo a cui arriveranno i componenti elettronici, e quindi c'è da ritenere che difficilmente la potenza di calcolo convenzionale potrà progredire in futuro al tasso che ha tenuto per gli ultimi cinquant'anni.

I nucleoni e la loro struttura interna esistono però a una scala un milione di volte più piccola. L'interazione forte, che governa questo regno, è circa 100 volte più intensa della forza elettromagnetica che alimenta l'attuale elettronica. Anzi, è la forza più intensa dell'universo. Sarà possibile mettere a punto una «femtotecnologia» che funzioni manipolando quark e gluoni? Da un certo punto di vista, questo tipo di tecnologia sarebbe un milione di volte più potente dell'attuale nanotecnologia. Certo, questo sogno rimarrà ipotetico fino a un futuro lontano, ma per arrivarci dobbiamo intanto cominciare a comprendere a fondo il mondo quantistico di quark e gluoni.

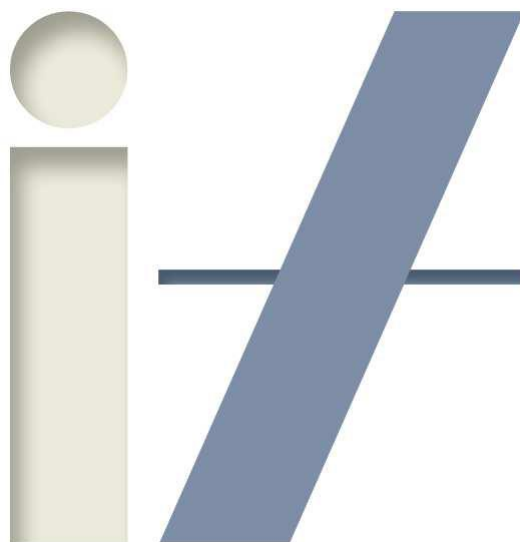
L'EIC è, in tutto il mondo, l'unica struttura sperimentale attualmente presa in considerazione che potrà fornirci i dati necessari per capire la QCD nel modo più compiuto. Costruirlo, tuttavia, non sarà facile. Il progetto avrà bisogno di fasci di elettroni, protoni e altri nuclei atomici luminosissimi e altamente concentrati in una vasta gamma di energie, in modo da generare da 100 a 1000 volte più eventi al minuto del collisore HERA.

Gli studi sullo spin richiedono da parte della macchina fasci di particelle i cui spin siano perfettamente allineati e possano essere controllati e manipolati. Queste difficoltà richiederanno innovazioni che promettono di trasformare la scienza degli acceleratori, non solo a beneficio della fisica nucleare, ma anche per i futuri acceleratori usati in medicina, nella scienza dei materiali e nella fisica delle particelle elementari. ■

PER APPROFONDIRE

An Assessment of U.S.-Based Electron-Ion Collider Science. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. National Academies Press, 2018. **https://doi.org/10.17226/25171.**

La colla che ci tiene insieme. Ent R., Ullrich T. e Venugopalan R., in «Le Scienze» n. 563, luglio 2015

INFORMATICA

di George Musser

Immaginazione Artificiale

Come le macchine potrebbero imparare la creatività, il buon senso e altre qualità umane

Se vi prende un attacco di cinismo a proposito degli esseri umani, un buon antidoto è parlare con i ricercatori che si occupano di intelligenza artificiale (IA). Potreste aspettarvi toni trionfalistici, adesso che i sistemi di IA hanno raggiunto o superato gli esseri umani nel riconoscere volti, tradurre lingue, vincere a giochi da tavola e videogiochi o ricordarsi di mettere la freccia. Invece parlano sempre di quanto sia meraviglioso il cervello umano, di quanto sia adattabile, efficiente, dotato di facoltà infinite. Le macchine ancora non hanno queste qualità. Sono inflessibili, opache e lente ad apprendere, dunque hanno bisogno di un lungo addestramento. Anche i successi tanto sbandierati sono molto limitati.

Molti ricercatori si sono dedicati all'IA perché vogliono capire, riprodurre e infine sorpassare l'intelligenza umana, ma persino quelli con interessi più pratici ritengono che i sistemi artificiali dovrebbero essere più simili a noi. Per esempio, una piattaforma di *social media* che addestra un sistema di riconoscimento delle immagini non avrà problemi a trovare foto di gatti o di personaggi famosi, ma altre categorie di dati sono più difficili da ottenere, e le macchine, se fossero più argute, potrebbero risolvere una maggior varietà di problemi. I dati sono particolarmente limitati per il mondo fisico. Se un robot deve imparare a manipolare cubi su un tavolo, non è realistico pensare di mostrargli ogni disposizione che potrebbe trovare; come un essere umano, dovrà apprendere alcune capacità generali, anziché imparare a memoria.

Mentre imparano a funzionare con meno input, le macchine devono anche produrre più risultati. Non basta la risposta, le persone vogliono conoscere anche il ragionamento che c'è dietro, soprattutto quando gli algoritmi decidono su prestiti e pene di reclusione. I burocrati umani possono essere interrogati riguardo ai loro pregiudizi e conflitti di interesse, ma buona fortuna a chi cerca di farlo con i sistemi attuali di IA. Nel 2018 l'Unione Europea ha dato ai cittadini un diritto limitato a ricevere una spiegazio-

IN BREVE

Diversi metodi emergenti danno a sistemi di intelligenza artificiale, come le reti neurali, caratteristiche un tempo considerate unicamente umane.

Il meta-apprendimento prepara una rete ad adattarsi rapidamente, in modo da poter imparare nuovi compiti senza aver bisogno di una montagna di dati.

Le cosiddette reti antagoniste generative offrono una specie di fantasia, permettendo alle macchine di riprodurre le caratteristiche statistiche degli insiemi di dati.

Il disentanglement permette alle reti neurali di diventare sensibili alla struttura di fondo dei dati e quindi ne rende più comprensibili i meccanismi interni in termini umani.

Illustrazione di Gabriel Silveira

ne per le decisioni prese con il trattamento automatico. Negli Stati Uniti la Defense Advanced Research Projects Agency sovvenziona un programma sulla «IA spiegabile», perché i comandanti non vorrebbero mandare le truppe in battaglia senza sapere il perché.

La comunità che si occupa di questi problemi è enorme, le idee sono tante e ci si chiede tra l'altro se per ottenere un'intelligenza più simile a quella umana sia necessario un cambiamento radicale degli strumenti in uso. Ma è ragguardevole il punto già raggiunto anche solo con miglioramenti incrementali. Automiglioramento, fantasia, buon senso: queste che sembrano qualità tipicamente umane sono già integrate nelle macchine, almeno in parte. Il punto chiave è un allenamento ben congegnato. Guidate da addestratori umani, le macchine fanno da sole i maggiori passi avanti.

Reti neurali profonde

Rispetto alla maggior parte degli altri campi di scienza e ingegneria, l'IA è più soggetta a un andamento ciclico. Vive ondate di infatuazione e abbandono, con metodi che ritornano più o meno d'attualità. La tecnologia in ascesa è quella delle reti neurali: strutture interconnesse di unità base di calcolo, i «neuroni». Ogni neurone può essere un interruttore che passa da acceso a spento o viceversa a seconda dello stato delle altre unità base a cui è collegato. Di solito i neuroni sono disposti su livelli: il primo livello accetta l'input (per esempio i pixel di un'immagine), l'ultimo livello produce l'output (una descrizione del contenuto dell'immagine) e i livelli intermedi, o «nascosti», generano combinazioni aritmetiche dell'input. Alcune reti, soprattutto quelle usate per problemi che si sviluppano nel tempo, per esempio il riconoscimento linguistico, hanno cicli che ricollegano l'output o i livelli nascosti all'input.

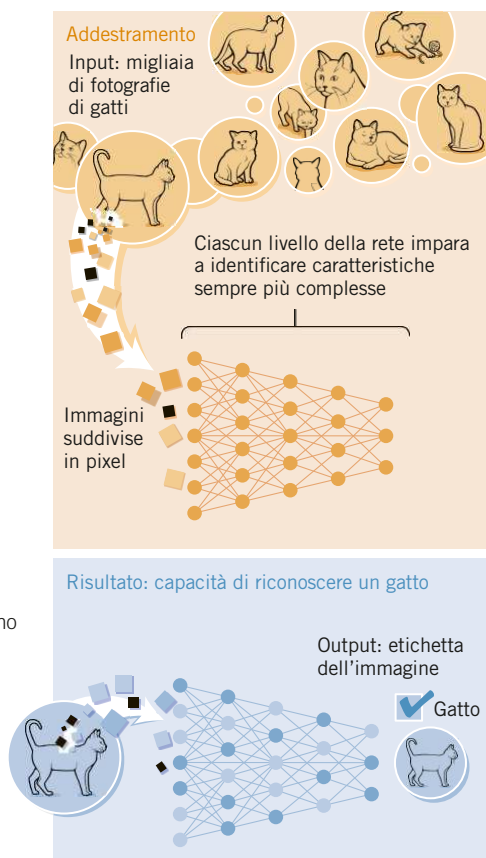
George Musser è *contributing editor* di «Scientific American». È autore, tra l'altro, di *Inquietanti azioni a distanza* (Adelphi, 2019).

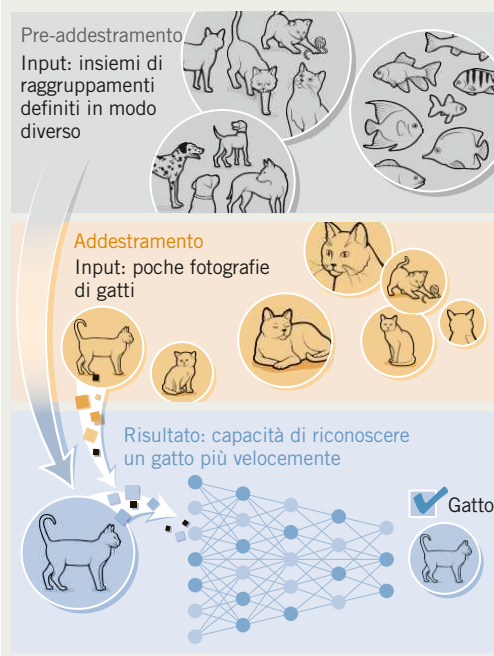
Una cosiddetta rete profonda ha decine o centinaia di livelli nascosti, che possono rappresentare strutture intermedie come spigoli e forme geometriche, anche se quello che fanno non è sempre evidente. Con migliaia di neuroni e milioni di interconnessioni, non c'è un percorso logico semplice nel sistema, che è intenzionalmente progettato in questo modo. Le reti neurali ottengono ottimi risultati nel risolvere problemi che non sono riducibili a regole logiche esplicite, per esempio nel riconoscimento di schemi.

Un aspetto cruciale è che le connessioni neurali non sono fissate in anticipo, ma si adattano in un processo per tentativi. Alla rete sono presentate immagini etichettate come «cane» o «gatto»; per ogni immagine, il sistema prova a indovinare l'etichetta; quando sbaglia, con un semplice esercizio di calcolo si modifica la forza delle connessioni che hanno contribuito al risultato sbagliato. Partendo da zero, quando la rete non sa che cosa sia un'immagine, men che mai un animale, i risultati non sono migliori di quelli che si otterrebbero con il lancio di una moneta. Ma dopo forse 10.000 esempi il sistema raggiunge il livello di un essere umano. Con altri

LE TECNICHE

Effetti di rete

Nonostante il loro immenso potere, le reti neurali hanno ancora grossi limiti. Per classificare le immagini, la rete prende come input i pixel, li elabora in diverse fasi e dà come output le probabilità che a quell'immagine si attribuiscano le diverse singole etichette. Per mettere a punto le interconnessioni di solito ci vogliono migliaia di immagini campione e inoltre il modo preciso in cui la rete giunge alla classificazione si perde nel groviglio delle connessioni. Diverse tecniche nuove risolvono questi problemi.

Meta-apprendimento

Per ridurre la quantità di dati necessari all'addestramento, i ricercatori possono preparare la rete sottoponendole esercizi dello stesso tipo generale. La rete non trattiene alcuna informazione, ma migliora gradualmente la propria capacità di risolvere qualsiasi nuovo compito le sia assegnato. Impara ad apprendere.

metodi di apprendimento la rete riesce a rispondere a indicazioni più vaghe o addirittura a discernere le categorie in autonomia.

Una rete neurale può classificare immagini che non ha mai visto prima. I teorici non sono ancora sicuri di come ci riesca, ma un fattore importante è che gli esseri umani che la usano devono tollerare errori o addirittura introdurne deliberatamente. Una rete che classifica correttamente il primo gruppo di immagini che riceve potrebbe lavorare male, basando il giudizio su indicazioni inaffidabili e variazioni invece che sulle caratteristiche essenziali.

Questa capacità delle reti di modellare se stesse significa che possono risolvere problemi che i progettisti umani non sanno come risolvere. Incluso come rendere le reti ancora migliori.

Il meta-livello

Spesso gli insegnanti lamentano che gli studenti dimenticano tutto in estate. Per ridurre, in un certo senso, la durata delle vacanze, caricano gli studenti di compiti. Ma gli psicologi, come Robert Bjork, dell'Università della California a Los Angeles, hanno scoperto che dimenticare non è dannoso per l'apprendimento, è essenziale. Lo stesso principio si applica anche per l'apprendimento automatico (*machine learning*).

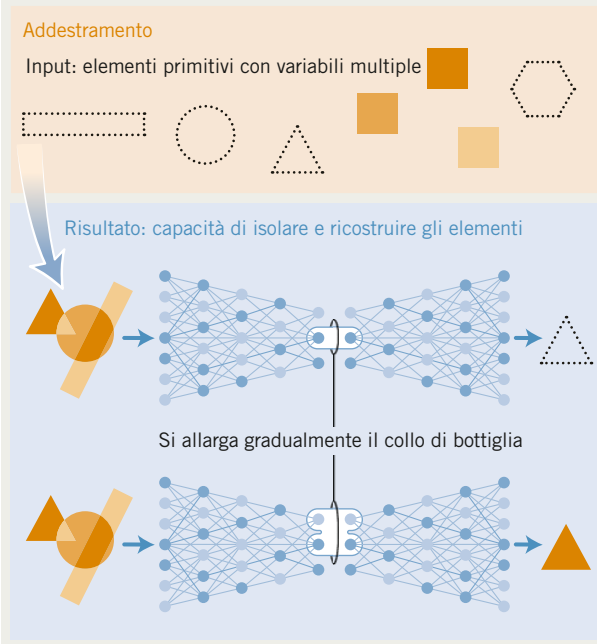
Se una macchina impara un compito e poi lo dimentica, poi ne impara un altro e lo dimentica, e avanti così, è possibile insegnarle a individuare le caratteristiche comuni ai vari compiti e in seguito apprenderà più in fretta le nuove varianti. Non avrà imparato niente di specifico, ma avrà appreso come imparare, quello che si definisce meta-apprendimento, e quando si vorrà che impari informazioni precise sarà pronta. «Quando hai imparato a fare 1000 compiti, il 1001 è molto più facile», dice Sanjeev Arora, teorico dell'apprendimento automatico alla Princeton University. È il dimenticare che permette di passare dall'apprendimento al meta-apprendimento. Se non si dimentica nulla, i compiti si confondono tra loro e la macchina non ne vede la struttura generale.

Il meta-apprendimento dà alle macchine un po' della nostra flessibilità mentale. «Probabilmente sarà un elemento chiave per raggiungere un'IA che funzioni al livello di un'intelligenza umana», afferma Jane Wang, neuroscienziata computazionale a DeepMind, di Google, a Londra. Viceversa, Wang ritiene che il meta-apprendimento dei computer aiuterà la scienza a capire quello che succede nella testa degli esseri umani.

In natura, il massimo esempio di algoritmo di meta-apprendimento è l'evoluzione darwiniana. In un ambiente mutevole, le specie sono spinte a sviluppare la capacità di apprendere invece di affidarsi a istinti fissi. Negli anni ottanta i ricercatori che studiavano l'IA hanno usato un'evoluzione simulata per ottimizzare gli agenti software per l'apprendimento. Ma l'evoluzione è una ricerca casuale che esplora un numero indefinito di vicoli ciechi, e nei primi anni duemila i ricercatori hanno trovato metodi più sistematici e più rapidi. Con il giusto regime di allenamento, qualsiasi rete neurale può apprendere a imparare. Come avviene per molte altre cose nell'apprendimento automatico, l'importante è essere precisi nell'indicare gli obiettivi. Se vogliamo che una rete impari a riconoscere volti, dovremo presentarle volti. Per analogia, se vogliamo che impari come apprendere, dovremo presentarle esercizi di apprendimento.

Reti antagoniste generative
Una rete capace di classificare le immagini si può far girare in senso contrario per generare immagini nuove, per esempio di gatti mai esistiti ma che sembrano veri. I ricercatori addestrano questa rete «generativa» abbinandola a un normale classificatore, che fa da critico e da allenatore. Nel sistema si introducono distorsioni casuali per garantire che ogni nuovo gatto sia diverso dagli altri.

Disentanglement
Una macchina può imparare a suddividere una scena negli oggetti che la compongono. Una rete comprime i dati in ingresso, l'altra li espande di nuovo. Riducendo il canale di collegamento tra le due, il sistema è obbligato a trovare la descrizione più economica; di solito si tratta della stessa descrizione che userebbe un essere umano, perciò il funzionamento del sistema è più trasparente.

Illustrazione di Brown Bird Design

Nel 2017 Chelsea Finn, dell'Università della California a Berkeley, e colleghi hanno sviluppato un metodo che hanno chiamato meta-apprendimento indipendente dal modello (*model-agnostic meta-learning*). Immaginiamo di voler insegnare a una rete neurale a classificare le immagini scegliendo una categoria tra cinque, che siano razze di cani, razze di gatti, marche di auto, colori di cappelli o altro. Nell'apprendimento normale, non «meta», immettiamo migliaia di immagini di cani e modifichiamo la rete in modo che le classifichi. Poi immettiamo migliaia di immagini di gatti, ma questo ha lo spiacevole effetto collaterale di annullare il lavoro sui cani; se apprende in questo modo, la macchina è in grado di eseguire solo un tipo di classificazione alla volta.

Nel meta-apprendimento indipendente dal modello, si inframezzano le categorie. Mostriamo alla rete solo cinque immagini di cani, una per ogni razza, e poi presentiamo un'immagine di prova per vedere fino a che livello riesce a classificarla correttamente; probabilmente non riuscirà molto bene, dopo soli cinque esempi. Riportiamo la rete al punto di partenza, cancellando le poche conoscenze che può aver appreso sui cani, ma, è il punto chiave, modifichiamo il punto di partenza in modo che la rete dia prestazioni migliori la volta successiva. Passiamo ai gatti, e di nuovo presentiamo solo un esempio di ogni razza. Continuiamo con auto, cappelli e così via, seguendo una rotazione casuale tra le categorie. Proponiamo ripetutamente i compiti e testiamo spesso il sistema.

La rete non impara a riconoscere specificamente cani, gatti, auto oppure cappelli, ma impara qual è lo stato iniziale che le permette di partire con il piede giusto per classificare qualsiasi cosa le sia presentata in gruppi di cinque. Alla fine diventa rapida: possiamo mostrarle cinque specie di uccelli e risponde subito correttamente.

Dimenticare non è dannoso per l'apprendimento, è essenziale. Lo stesso principio si applica anche per l'apprendimento automatico

Secondo Finn la rete diventa così acuta perché sviluppa una distorsione, che in questo contesto è una cosa positiva. Si aspetta che i dati di ingresso abbiano la forma di un'immagine e si prepara di conseguenza. «Se hai una capacità di rappresentazione che sa riconoscere le forme degli oggetti, i colori degli oggetti e la loro consistenza e che sa rappresentare queste cose in modo conciso, allora quando vedi un oggetto nuovo dovresti riuscire a riconoscerlo rapidamente», afferma.

Finn ha applicato questa tecnica anche ai robot sia reali che virtuali. In un esperimento ha dato a un robot con quattro zampe una serie di comandi, ordinandogli di correre in varie direzioni. Con il meta-apprendimento, il robot ha capito che la caratteristica comune dei comandi era «correre» e che l'unica domanda era «in quale direzione?», così si preparava correndo sul posto. «Quando corri sul posto, è più facile adattarsi rapidamente a correre in avanti o all'indietro, perché stai già correndo», spiega Finn.

Questa tecnica, come altri approcci simili provati da Wang e altri, ha i suoi limiti. Anche se riduce la quantità di dati campione necessari per un compito, in generale ne richiede tanti. «I metodi attuali di meta-apprendimento richiedono un enorme addestramento preventivo», dice Brenden Lake, scienziato cognitivo dell'Università di New York (NYU), uno dei più importanti paladini di un'IA più umana. Il meta-apprendimento è anche impegnativo dal punto di vista computazionale perché sfrutta differenze tra i comandi che a volte sono molto sottili. Se i problemi non sono definiti abbastanza bene a livello matematico, i ricercatori devono ripiegare sugli algoritmi evolutivi, più lenti. «Le reti neurali hanno fatto passi avanti, ma sono lontane dal raggiungere un apprendimento dei concetti simile a quello degli esseri umani», afferma Lake.

Cose mai esistite

Proprio quello che mancava su Internet: altre foto di personaggi famosi. Negli ultimi anni l'etere è stato inondato da un tipo nuovo e strano di fotografie, immagini di persone che in realtà non sono esistite. Sono il prodotto di una nuova tecnologia di IA con una forma ingegnosa di fantasia. «Cerca di immaginare foto di persone nuove che dall'aspetto potrebbero credibilmente essere personaggi famosi nella società», dice Ian J. Goodfellow di Google Brain a Mountain View, in California. «Si ottengono fotografie molto realistiche di persone attraenti secondo i canoni convenzionali».

La fantasia è abbastanza facile da automatizzare. In pratica basta prendere una rete neurale di riconoscimento immagini, chiamata anche «discriminatore», e farla girare al contrario; a quel punto diventa una rete di produzione di immagini, detta anche «generatore». Un discriminatore riceve come input i dati e restituisce un'etichetta, per esempio una razza di cani. Un generatore riceve un'etichetta e restituisce dati. La parte difficile è far sì che questi dati siano significativi: se come input si inserisce «Shih Tzu», la rete deve restituire un archetipo di Shih Tzu e per produrre un cane su richiesta ha bisogno di sviluppare al suo interno l'idea di cane. Mettere a punto una rete che faccia tutto questo è difficile dal punto di vista computazionale.

Nel 2014 Goodfellow, che all'epoca stava finendo il dottorato, ha pensato di far lavorare in coppia i due tipi di rete. Un generatore crea un'immagine e un discriminatore la confronta ai dati, così il controllo pignolo del discriminatore allena il generatore. «Abbiamo creato un gioco tra due giocatori», dice Goodfellow. «Uno è una rete generativa che crea immagini, l'altro è una rete discriminativa che guarda le immagini e cerca di capire se siano vere o false». La tecnica è nota come «reti antagoniste generative».

All'inizio il generatore produce rumore casuale, che non è un'immagine di qualcosa, tanto meno rappresentativa dei dati di addestramento. Ma all'inizio neanche il discriminatore è capace di discernere granché. Via via che questo affina i gusti, anche il generatore deve migliorare le prestazioni, quindi i due si spronano a vicenda. In quella che è una vittoria dell'artista sul critico, alla fine il generatore riproduce i dati con tanta verosimiglianza che il discriminatore è ridotto a indovinare, a caso, se l'output sia vero o no.

La procedura è complessa e le reti possono bloccarsi, creare immagini non realistiche o non riuscire a catturare tutta la varietà dei dati. Per esempio il generatore, per fare il minimo necessario per ingannare il discriminatore, potrebbe collocare i volti sempre contro lo stesso sfondo. «Non abbiamo una buona teoria matematica del perché alcuni modelli riescano a offrire buoni risultati e altri no», afferma Goodfellow.

Comunque sia, poche altre tecniche di IA hanno trovato così tanti usi in così poco tempo, dall'analisi di dati cosmologici alla progettazione di capsule dentali. Ogni volta che è necessario assorbire un set di dati e produrre dati simulati con gli stessi indicatori statistici si può usare una rete antagonista generativa. «Basta fornire un bel po' di immagini e chiedere: "Ne puoi fare altre come queste?"»,

spiega Kyle Cranmer, fisico alla NYU, che ha usato la tecnica per simulare le collisioni di particelle in modo più rapido di quanto ci sarebbe voluto per risolvere tutte le equazioni quantistiche.

Una delle applicazioni più notevoli è Pix2Pix, che può realizzare ogni genere di elaborazione di immagini. Per esempio, un programma di grafica come Photoshop può facilmente prendere un'immagine a colori e ridurla in scala di grigio o addirittura a disegno tratteggiato, ma andare nell'altra direzione è molto più difficile, perché per colorare un'immagine o un disegno bisogna fare scelte creative. Ma Pix2Pix può farlo. Basta inserire coppie campione di immagini a colori e disegni tratteggiati e il programma impara a metterli in relazione. Poi si può inserire un disegno tratteggiato e Pix2Pix lo completerà come immagine, anche per aspetti su cui in origine non ha ricevuto un addestramento specifico.

Altri progetti sostituiscono la competizione con la collaborazione. Nel 2017 Nicholas Guttenberg e Olaf Witkowski, dell'Earth-Life Science Institute di Tokyo, hanno impostato una coppia di reti a cui hanno mostrato mini-dipinti che avevano creato, di vari stili. Le reti dovevano determinare lo stile usato, ma ciascuna vedeva una parte diversa del dipinto, quindi dovevano collaborare. Per farlo dovevano sviluppare un linguaggio privato, che era semplice ma abbastanza espressivo per il compito. «Trovavano un insieme di cose in comune di cui parlare», racconta Guttenberg.

Le reti che imparano da sole a comunicare aprono nuove possibilità. «La speranza è vedere una società di reti che sviluppano un linguaggio e si insegnano capacità a vicenda», dice Guttenberg. E se una rete riesce a comunicare quello che fa a un'altra rete, forse può imparare a spiegare come funziona anche a un essere umano, rendendo meno imperscrutabile il suo modo di ragionare.

Imparare il buon senso

La parte più divertente di una conferenza sull'IA è quella in cui un ricercatore mostra gli errori sciocchi fatti dalle reti neurali, che scambiano per esempio l'immagine casuale dell'assenza di segnale video per un armadillo, o uno scuolabus per uno struzzo. La conoscenza di cui dispongono è molto superficiale, e gli schemi che riconoscono possono essere scollegati dagli oggetti fisici che compongono una scena. «Non hanno la comprensione della composizione degli oggetti che hanno persino animali come i ratti», spiega Irina Higgins, ricercatrice sull'IA a DeepMind.

Nel 2009 Yoshua Bengio, dell'Università di Montreal, ha ipotizzato che le reti neurali sarebbero giunte a una comprensione vera e propria se si fossero potute districare le loro rappresentazioni interne, cioè se ciascuna delle loro variabili fosse corrisposta a un elemento indipendente del mondo. Per esempio, la rete dovrebbe avere una variabile di posizione per ogni oggetto. Se un oggetto si muove, ma il resto rimane uguale, dovrebbe cambiare solo quella variabile, anche se sono cambiate centinaia di migliaia di pixel.

Nel 2016 Higgins e colleghi hanno trovato un modo per farlo. Si basa sul principio che il vero insieme di variabili, che corrisponde alla vera struttura del mondo, sia anche il più economico. I milioni di pixel di un'immagine sono generati da relativamente poche variabili combinate in una moltitudine di modi. «Il mondo è dotato di ridondanza, ed è il tipo di ridondanza che il cervello può comprimere e sfruttare», dice Higgins. Per raggiungere una descrizione parsimoniosa, la sua tecnica usa l'equivalente computazionale dello strizzare gli occhi: limita deliberatamente la capacità della rete di rappresentare il mondo, in modo che sia costretta a selezionare solo i fattori più importanti. Poi si allenta gradualmente la limitazione e si permette alla rete di includere fattori secondari.

In una dimostrazione, Higgins e colleghi hanno costruito un «mondo» semplice da far esaminare alla rete. Era composto da elementi a forma di cuore, quadrato e ovale disposti su una griglia, ciascuno dei quali poteva essere di sei dimensioni diverse e avere 20 diversi angoli di orientamento. I ricercatori hanno presentato tutte le permutazioni alla rete, il cui compito era isolare i cinque fattori di fondo: forma, posizione sui due assi, orientamento e dimensione. All'inizio hanno permesso un solo fattore e la rete ha scelto la posizione come quello più importante, la variabile senza la quale nessuna delle altre avrebbe avuto senso. Poi la rete ha aggiunto gli altri fattori in successione.

In questa dimostrazione i ricercatori conoscevano le regole del mondo perché le avevano scelte loro. Nella vita reale non sarebbe così ovvio capire se questo metodo del districamento (chiamato in inglese *disentanglement*) funzioni o meno. A oggi per determinarlo è ancora necessario il giudizio soggettivo di un essere umano.

Come il meta-apprendimento e le reti antagoniste generative, anche il disentanglement ha molte applicazioni. Innanzitutto rende più comprensibili le reti neurali, perché diventa possibile osservarne il ragionamento, molto simile a quello umano. Un robot può anche usare il disentanglement per creare una mappa dell'ambiente che lo circonda e pianificare il movimento, invece di muoversi goffamente per tentativi. Abbinato a quella che i ricercatori chiamano motivazione intrinseca (in pratica la curiosità), il metodo guida un robot in un'esplorazione sistematica.

Inoltre il disentanglement aiuta le reti ad apprendere nuovi insiemi di dati senza perdere quello che già conoscono. Per esempio, immaginiamo di mostrare alla rete immagini di cani: sviluppa una rappresentazione districata specifica delle specie canine. Se poi passiamo ai gatti, le nuove immagini si collocano al di fuori di quella rappresentazione (le vibrisse sono un indizio evidente) e la rete nota il cambiamento. «Possiamo guardare a come rispondono i neuroni, e se iniziano a comportarsi in modo atipico probabilmente significa che dobbiamo iniziare l'apprendimento relativo a un nuovo set di dati», dice Higgins. A quel punto la rete potrebbe adattarsi, per esempio aggiungendo nuovi neuroni per immagazzinare le nuove informazioni senza sovrascrivere quelle vecchie.

Molte qualità che i ricercatori dell'IA danno alle loro macchine sono associate, negli esseri umani, alla coscienza. Nessuno sa bene che cosa sia la coscienza o perché noi esseri umani abbiamo una vita mentale così vivace, ma ha a che fare con la nostra capacità di creare modelli del mondo e di noi stessi. I sistemi di IA hanno bisogno di questa stessa capacità. Una macchina dotata di coscienza sembra ancora lontana, ma forse le tecnologie attuali sono i primi piccoli passi in quella direzione. ■

PER APPROFONDIRE

Generative Adversarial Nets. Goodfellow I.J. e altri, presentato alla 2014 Neural Information Processing Systems Conference, Montreal, 8-14 dicembre 2014. **https://papers.nips.cc/paper/5423-generative-adversarial-nets.**

Deep Learning. LeCun Y. e altri, in «Nature», Vol. 521, pp. 436-444, 28 maggio 2015.

beta-VAE: Learning Basic Visual Concepts with a Constrained Variational Framework. Higgins I. e altri, presentato alla 5th International Conference on Learning Representations, Tolone, Francia, 24-26 aprile 2017.

Model-Agnostic Meta-Learning for Fast Adaptation of Deep Networks. Finn C. e altri, presentato alla 34th International Conference on Machine Learning, Sydney, Australia, 6-11 agosto 2017.

Macchine che imparano. Bengio Y., in «Le Scienze» n. 576, agosto 2016.

NEUROSCIENZE SOCIALI

Meccanismi dell'aggressività umana

Esperimenti su esseri umani e animali hanno cominciato a chiarire come i comportamenti violenti hanno inizio nel cervello

di R. Douglas Fields

Illustrazione di Scott Bakal

R. Douglas Fields è un neuroscienziato e autore dei libri *Why We Snap*, sugli aspetti neuroscientifici del comportamento aggressivo improvviso, ed *Electric Brain* (in uscita) sulla ricerca sulle onde cerebrali e la stimolazione del cervello. Fields è *adjunct professor* del programma di neuroscienze e scienze cognitive dell'Università del Maryland a College Park e capo della sezione sviluppo e plasticità del sistema nervoso del National Institute of Child Health and Human Development.

Nel 2017 un cecchino appostato al trentaduesimo piano del Mandalay Bar Hotel di Las Vegas ha sparato con potenti fucili 1000 pallottole contro gli spettatori di un concerto, uccidendo 58 innocenti e ferendone altri 869. Il cervello di quell'assassino di massa, suicidatosi sulla scena stessa del crimine, è stato poi inviato alla Stanford University per cercare una possibile spiegazione biologica di questo tragico episodio.

Che cosa mai potrebbero trovare gli scienziati con un esame del genere? Molto, in effetti. Non ci sono test genetici in vista per il comportamento omicida, ma questo tipo di studi può farci capire come la violenza è controllata dal cervello. Usando gli stessi metodi sperimentali che hanno permesso tracciare i circuiti cerebrali responsabili di altre attività umane complesse – come camminare, parlare e leggere – ora i neuroscienziati possono identificare le vie neurali alla base dei comportamenti aggressivi. Queste nuove scoperte contribuiscono a svelare i meccanismi sottostanti ad atti di violenza estrema, come l'atroce crimine di Las Vegas, ma aiutano anche a spiegare la più comune rabbia al volante e addirittura l'istantanea risposta delle madri a ogni pericolo per i figli.

La violenza fisica, a volte mortale, è il fulcro della naturale lotta per la sopravvivenza del più adatto, e tutti gli animali hanno evoluto circuiti neurali specializzati per mettere in atto – e controllare – i comportamenti aggressivi. In esperimenti pionieristici sui gatti condotti verso la fine degli anni venti, Walter Hess scoprì un sito profondo nell'ipotalamo, un'area cerebrale che scatena l'aggressione violenta. Lo stesso punto – si è scoperto – in cui si attivano anche altre potenti pulsioni e comportamenti compulsivi, come quelli legati a sesso, mangiare e bere. Quando Hess stimolava questo groviglio di neuroni con un elettrodo inserito nel cervello di un gatto docile, subito il felino si scatenava con una rabbia sibilante, attaccando e uccidendo un altro animale presente nella gabbia. La stessa struttura neurale, detta area d'attacco ipotalamica, c'è anche nel cervello umano.

Quella scoperta ha aperto la strada al concetto ampiamente pubblicizzato di «cervello rettiliano», secondo cui negli esseri umani le pulsioni più primitive scaturiscono da un antico nucleo neurale che, nelle giuste circostanze, scatena comportamenti bestiali. Dopo la scoperta di Hess, la questione vitale che gli scienziati si trovano ad affrontare da quasi un secolo è centrata su quali circuiti alimentano l'area d'attacco nell'ipotalamo per attivare o reprimere gli attacchi. Tecniche relativamente nuove – l'optogenetica (un metodo sperimentale per attivare e disattivare i circuiti cerebrali) e telecamere a fibre ottiche inserite nel cervello di animali per osservare i neuroni che scaricano durante un attacco violento – permettono di trovare risposta ad alcune di queste domande. Oggi, in effetti, è possibile identificare vari circuiti della rabbia e dell'aggressione.

Per motivi etici, molta attività di ricerca che traccia i circuiti neurali del comportamento violento proviene da studi su animali. Bisogna fare attenzione quando si applica la terminologia usata nello studio degli animali al comportamento e alle emozioni degli esseri umani, ma ci sono chiari parallelismi tra la violenza nella nostra specie e in altri vertebrati. Commettere un'aggressione fisica è un potenziale pericolo mortale per qualsiasi animale, quindi questo comportamento è strettamente regolato ed è esibito solo in risposta a specifici tipi di pericoli percepiti.

Esseri umani e altri animali usano la violenza, addirittura aggressioni mortali, istintivamente per procurarsi cibo, proteggere i propri piccoli o difendersi da lesioni al proprio corpo. Ma per ogni tipo di atto violento – uccidere una preda o difendere i piccoli, per esempio – entrano in gioco connessioni neurali separate tra loro.

Molte specie animali, inoltre, sono assai sociali, e i comportamenti aggressivi sono il modo con cui stabilire e mantenere l'ordine sociale; si pensi agli arieti che fanno a testate per determinare chi potrà riprodursi con le femmine. Per gli esseri umani, pena

IN BREVE

Gli esseri umani, come anche altri animali, a volte ricorrono alla violenza per procurarsi il cibo o per difendersi.

Decidere di agire in modo aggressivo comporta un rischio e mette in gioco specifici circuiti nel cervello.

I percorsi neurali per la risposta alle minacce immediate sono diversi da quelli per le azioni che richiedono una riflessione.

Tratti cerebrali anormali appaiono più spesso nei criminali violenti rispetto a quelli senza una storia di violenza.

GLOSSARIO

Neuroanatomia dei comportamenti aggressivi

Amigdala. Questa struttura si trova nelle profondità del lobo temporale, risponde agli eventi con una forte carica emotiva ed è coinvolta nel rilevamento dei pericoli, nella paura, nei comportamenti aggressivi e nell'ansia.

Tronco encefalico. Per questa struttura centrale di collegamento passano fibre nervose da ogni parte del cervello e del midollo spinale. Durante un combattimento, controlla i movimenti riflessi della testa.

Ipotalamo. È il centro di smistamento delle informazioni che vanno e vengono tra cervello e midollo spinale, regola il rilascio di ormoni dalla ghiandola pituitaria, mantenendo funzioni corporee vitali come termoregolazione, assunzione di cibo, comportamento sessuale e comportamenti aggressivi.

Sistema limbico. Questa rete collega tra loro amigdala, ipotalamo, ippocampo e corteccia cerebrale, combinando emozione, apprendimento, memoria e rilevamento dei pericoli.

Ghiandola pituitaria. Situata in cima al tronco encefalico, libera nel flusso sanguigno ormoni che controllano la risposta di attacco o fuga e la riproduzione.

Corteccia prefrontale. Regione della corteccia cerebrale nella parte anteriore del cervello (sotto la fronte) che integra le informazioni per prendere decisioni complesse, concentrare l'attenzione e regolare gli impulsi.

capitale, prigione e sottrazione forzata di risorse (multe e revoca di privilegi) sono tutte forme codificate di aggressione mirate a mantenere l'ordine sociale. Difesa del territorio, protezione di altri membri del gruppo e competizione sono ulteriori parallelismi che permettono agli scienziati di estrapolare da studi su animali, così da trovare specifici circuiti neurali negli esseri umani per ciascun tipo di comportamento aggressivo.

Dal punto di vista psicologico, l'aggressione umana può essere scatenata da una serie di provocazioni e motivi che pare infinita, ma dal punto di vista delle neuroscienze solo pochi e specifici circuiti neuronali nel cervello sono responsabili di questo comportamento. Identificarli e capire come funzionano è un lavoro ancora in corso, ma cruciale. Troppo spesso la capacità di aggressione violenta, incisa nel nostro cervello da epoche di lotta tenace per la sopravvivenza, funziona in modo sbagliato in seguito a malattie, droghe o disturbi psichiatrici, e può avere conseguenze tragiche.

I circuiti neurali dell'aggressione

La decisione di passare all'uso violento della forza è piena di rischi, e prima che una persona si scagli contro qualcuno diventa attivo un insieme di circuiti neurali intricati che si estendono nel cervello. Per capire l'anatomia dell'aggressione, immaginiamo il cervello umano come se avesse la struttura di un fungo. La pelle sottile che ricopre il cappello del fungo equivale alla corteccia cerebrale. Spessa appena 3 millimetri, la corteccia è un centro delle funzioni cognitive superiori: l'essenza di quello che ci rende umani. È coinvolta anche nell'integrazione sensomotoria (percezione che innesca l'azione) e nella coscienza stessa; e svolge anche un ruolo chiave nella decisione di un animale di esibire o meno un comportamento aggressivo.

L'amigdala, una struttura che si trova in profondità sotto la corteccia cerebrale e che valuta rapidamente gli stimoli sensoriali in ingresso per individuare possibili minacce, sarebbe situata in cima al gambo del fungo, nella zona da cui si irradiano le lamelle che sostengono il cappello. L'amigdala ha collegamenti ampiamente ramificati in entrata e in uscita che spaziano dalla corteccia cerebrale all'ipotalamo. Questa struttura a forma di mandorla è un punto centrale nella ritrasmissione dell'informazione sensoriale che arriva al cervello, come anche dei segnali provenienti dalla corteccia cerebrale, che comunicano i risultati dei processi decisionali e di altre elaborazioni delle informazioni di alto livello.

L'ipotalamo, sempre in cima al gambo, è la regione cerebrale che inconsciamente controlla le funzioni automatiche del corpo, tra cui pulsazioni cardiache, respirazione, cicli del sonno, attenzione e rilascio di ormoni da parte della ghiandola pituitaria. È dove si genera la spinta emotiva a iniziare un attacco. Il tronco encefalico, l'analogo dello stelo nel fungo, trasmette l'informazione da e per il cervello attraverso il midollo spinale. Per descrivere in modo preciso l'analogia, è importante ricordare che il cervello umano è una struttura accoppiata, con emisferi destro e sinistro separati. C'è un'amigdala, per esempio, sia sul lato destro sia sul lato sinistro del cervello.

La molteplicità delle regioni che controllano i comportamenti aggressivi permette al cervello di pensare velocemente o lentamente in risposta a una minaccia. Quest'ultima reazione più contemplativa, però, è la più complessa delle due, e la corteccia prefrontale ha un ruolo critico in questo processo decisionale. In uno studio del 2013 il neuroscienziato Simone Motta e i suoi colleghi che lavorano nel laboratorio di Newton Sabino Canteras all'Università di São Paulo, in Brasile, hanno ottenuto i dettagli biologici della familiare reazione da «mamma orsa», che non è affatto limitata alle mamme orse.

I ricercatori hanno osservato al microscopio l'ipotalamo di una mamma di ratti subito dopo l'entrata di un maschio estraneo nella gabbia in cui la mamma si trovava con i suoi piccoli, un ingresso che aveva spinto la femmina ad attaccare. Dopo aver colorato il tessuto cerebrale *post mortem*, gli scienziati hanno identificato una proteina chiamata Fos nella minuscola regione ipotalamica coinvolta nel comportamento di attacco. Al microscopio sembrava che quest'area fosse stata riempita di punti neri con una penna. L'improvvisa comparsa di Fos, rappresentata dai punti neri, era dovuta alla rapida sintesi della proteina come conseguenza di raffiche di impulsi elettrici scaricate da neuroni nella regione di attacco quando la madre era stata provocata ad assalire l'intruso. Altri gruppi di ricerca hanno confermato il legame con il comportamento aggressivo, servendosi di una telecamera a fibra ottica inserita nella regione d'attacco ipotalamica di topi geneticamente modificati in modo da avere neuroni che emettono lampi di luce quando scaricano.

Quando questo ammasso di neuroni, detto nucleo premammillare ventrale, è stato rimosso dalla regione d'attacco ipotalamica prima dell'entrata di un intruso, il gruppo di Motta ha trovato che

la reazione di una madre con un attacco difensivo era assai meno probabile. Distruggere questi neuroni, però, non influiva sulla risposta della madre a un predatore come un gatto oppure ad altre minacce. Gli elettrodi usati quasi un secolo fa da Hess erano troppo grossolani per rivelare la struttura fine dei sottocircuiti del comportamento aggressivo nella regione d'attacco ipotalamica. Oggi nuovi metodi di analisi stanno delineando un quadro assai più dettagliato.

Affinché quest'area sia attivata da un intruso maschio, la relativa informazione sensoriale deve essere ricevuta, elaborata e ritrasmessa tramite l'ipotalamo. Tutti i sensi principali arrivano al cervello seguendo cammini neurali separati: i segnali visivi passano per il nervo ottico, gli odori per il nervo olfattivo. L'informazione sensoriale in entrata raggiunge la corteccia cerebrale, dove è analizzata per estrarre caratteristiche dettagliate di uno stimolo, per poi inviare un segnale corrispondente a ognuno dei relativi sensi a un'altra regione più specializzata della corteccia. Per esempio, la corteccia visiva nella parte posteriore della nostra testa estrae forma, colore e movimento di un oggetto contrapposto al campo visivo e poi trasmette quell'informazione ad altre regioni della corteccia che portano alla percezione della nostra mente cosciente, permettendo, per esempio, il riconoscimento di un volto familiare.

Ma questa complessa forma di elaborazione dell'informazione, che impegna varie regioni corticali in successione come in una catena di montaggio di automobili, richiede del tempo. Di fronte a una minaccia improvvisa, diciamo un pugno diretto al mento, il tempo richiesto per elaborare lo stimolo visivo e percepirlo in modo consapevole sarebbe troppo lungo per permetterci di schivare il colpo. Ecco perché si è evoluto un cammino subcorticale ad alta velocità che recluta l'amigdala per trasmettere rapidamente le informazioni sensoriali in entrata ai circuiti cerebrali che rilevano i pericoli. Il flusso dei dati sensoriali raggiunge l'amigdala prima di arrivare alla corteccia cerebrale e alla coscienza consapevole, motivo per cui prima ci proteggiamo e respingiamo un pallone che all'improvviso vediamo avvicinarsi, e poi domandiamo: «E quello che cos'era?» L'oggetto che irrompe inatteso nel nostro spazio personale è percepito come una minaccia anche se non riusciamo a farcene un'immagine precisa. In modo simile ai sensori di movimento dei sistemi di sicurezza, l'amigdala rileva un oggetto che non dovrebbe essere lì e attiva rapidamente una risposta aggressiva per affrontare la minaccia.

Gli esseri umani dipendono fortemente dal senso della vista, ma per molti animali è più importante l'olfatto. Negli esperimenti di Motta, molto probabilmente è stato l'odore ad allertare il meccanismo di rilevamento delle minacce del ratto femmina riguardo al maschio intruso, e quell'informazione avrebbe potuto essere rapidamente ritrasmessa all'area d'attacco ipotalamica. Osservando l'amigdala al microscopio, i ricercatori hanno visto due aree che erano state colorate per la presenza di Fos, in risposta all'attacco dell'intruso. Ma entrambe queste regioni dell'amigdala, nel suo nucleo mediale, ricevono segnali dalla regione olfattiva. La regione del nucleo premammillare dell'ipotalamo, dove è centrata la risposta aggressiva materna, ospita neuroni noti per rispondere solo agli odori provenienti dall'altro sesso.

Anche un'altra parte dell'amigdala, il nucleo posteriore, ha mostrato ampie prove di colorazione dovuta alla presenza della proteina Fos. I neuroni di quest'area hanno recettori per ormoni (i mineralocorticoidi) che collegano gli stress all'innesco di comportamenti aggressivi. In altri studi su ratti maschi aggressivi, gli animali diventano docili quando questi recettori vengono bloccati. Questa osservazione spiega in parte come aspetti molteplici di una data situazione, stress o altri fattori, possano abbassare la soglia di induzione del comportamento aggressivo.

Dal punto di vista psicologico, l'aggressione umana può essere scatenata da una serie di provocazioni e motivi che pare infinita, tuttavia dal punto di vista delle neuroscienze solo pochi e specifici circuiti neuronali nel cervello sono responsabili di questo comportamento

Esperimenti sull'uomo

L'intento di tutte queste ricerche è determinare se l'attivazione oppure lo spegnimento di una particolare area del cervello producano o meno uno specifico comportamento. Gli studi sugli animali tuttavia non possono dirci un gran che sulle effettive sensazioni coinvolte in uno qualsiasi dei comportamenti risultanti. Stimolare il cervello di un ratto con un elettrodo potrebbe anche indurre un senso di dolore che poi provoca una reazione violenta, ma senza indicare in alcun modo se la reazione sia o meno il risultato diretto dell'attivazione di un centro cerebrale che è collegato al comportamento aggressivo.

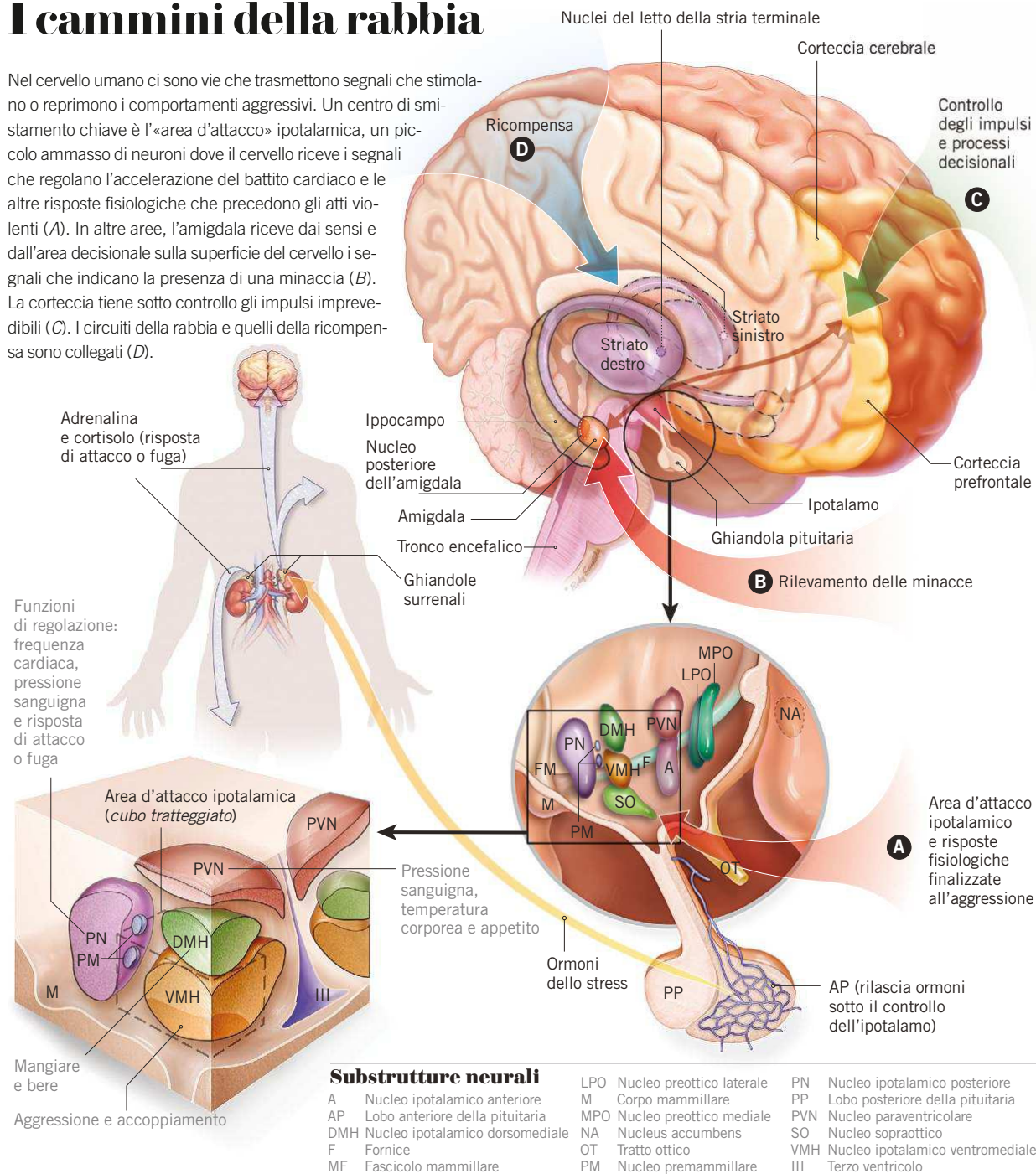
Alcuni esperimenti sugli esseri umani, però, non hanno lasciato dubbi sul fatto che l'amigdala scatena intense emozioni violente. Negli anni sessanta, quando il compianto neurofisiologo spagnolo José Manuel Rodríguez Delgado stimolò un elettrodo nell'amigdala destra di una donna che suonava tranquillamente una chitarra, la donna smise di suonare e cantare, scagliò via lo strumento in un impeto di rabbia e partì all'attacco di una parete della stanza. Per poter scatenare comportamenti violenti, queste potenti emozioni devono prevalere su impulsi concorrenti. Il rischio di decidere di lanciare un attacco potrebbe portare a una rappresaglia che metta l'aggressore a rischio di gravi lesioni – o di morte – o alternativamente di un sentimento di vergogna come risultato di una fuga di fronte a una minaccia.

Le sedi neurali della rabbia cieca nei ratti e negli esseri umani fanno parte di una vasta rete cerebrale che si estende oltre l'amigdala e scatena comportamenti violenti. Alcuni ricercatori hanno scoperto un sito della regione settale, parte di quello che è chiamato «sistema limbico subcorticale», che si accende dopo che una femmina di ratto ha respinto un intruso per proteggere i propri piccoli. L'area settale attiva intense risposte emotive, come la rabbia esplosiva, ed è all'opera anche nel sesso e in altre attività gratificanti. Nel 1950 James Olds e Peter Milner hanno mostrato che i ratti con elettrodi impiantati nella regione settale potevano continuare a premere una leva che stimolava elettricamente i relativi neuroni fino allo sfinimento, fino a 5000 volte in un'ora.

Un esperimento corrispondente ha coinvolto volontari umani.

I cammini della rabbia

Nel cervello umano ci sono vie che trasmettono segnali che stimolano o reprimono i comportamenti aggressivi. Un centro di smistamento chiave è l'«area d'attacco» ipotalamica, un piccolo ammasso di neuroni dove il cervello riceve i segnali che regolano l'accelerazione del battito cardiaco e le altre risposte fisiologiche che precedono gli atti violenti (*A*). In altre aree, l'amigdala riceve dai sensi e dall'area decisionale sulla superficie del cervello i segnali che indicano la presenza di una minaccia (*B*). La corteccia tiene sotto controllo gli impulsi imprevedibili (*C*). I circuiti della rabbia e quelli della ricompensa sono collegati (*D*).

Illustrazione di Body Scientific

Quando Delgado ha stimolato la regione settale di alcuni pazienti, i soggetti sono stati subito sopraffatti da forti sensazioni sessuali che alla fine hanno portato a un orgasmo. Una paziente ha iniziato ad avere atteggiamenti seduttivi, e addirittura ha proposto al terapeuta di sposarla.

In studi pubblicati nel 1972 e oggi riconosciuti come inammissibili dal punto di vista etico, lo psichiatra Robert G. Heath, della Tulane University, cercò di «guarire» un giovane dall'omosessualità. Nella regione settale del cervello dell'uomo, Heath impiantò elettrodi che permettevano al medico, o al paziente stesso, di generare stimoli neurali che davano piacere sessuale durante la proiezione di film pornografici eterosessuali e nel corso di rapporti sessuali con una prostituta. Heath riferì che il soggetto si autostimolava con gli elettrodi fino all'euforia. Il suo orientamento sessuale, però, rimase lo stesso.

I neuroni in questa parte dell'area settale (i nuclei del letto della stria terminale, o BNST), che negli studi sugli animali si attivano nell'aggressione materna, hanno anche recettori per la noradre-

nalina, un neurotrasmettitore coinvolto nelle risposte allo stress. Questa regione cerebrale si connette all'ipotalamo per il controllo delle risposte autonome e il rilascio di ormoni come l'ossitocina o il neurotrasmettitore dopamina, che regolano stress, umore e ansia; inoltre, riceve segnali dalla corteccia cerebrale.

I circuiti del comportamento aggressivo vanno verso l'alto che verso il basso. La corteccia prefrontale può inibire o stimolare il sistema limbico, reprimendo un impulso o dando il via a un'azione violenta in base a processi deliberativi che avvengono nelle aree dei processi cognitivi di alto livello. All'opposto di questo approccio «dall'alto in basso» da parte della corteccia prefrontale si trova la rapida risposta riflessa a un improvviso stimolo ambientale, come quando un pallone che arriva all'improvviso è deviato senza alcun pensiero cosciente. Animali e persone con connessioni più deboli dalla corteccia prefrontale al sistema limbico hanno difficoltà nel controllare gli impulsi.

I centri cerebrali della ricompensa, di cui fanno parte striato e nucleo accumbens, dove agisce il neurotrasmettitore dopamina, sono altri componenti dei circuiti dell'aggressività. Molte droghe d'abuso e dipendenza – per esempio metanfetamina e cocaina – aumentano la dopamina, che modula la ricompensa, per far scattare questi circuiti. Quando un ratto maschio riesce a sconfiggerne un altro che sconfina nella sua gabbia, subito dopo attiva più volte la leva che apre il passaggio all'intruso per farlo entrare e battersi ancora. Se si blocca il segnale della dopamina con un farmaco, il ratto maschio smette di provocare altri scontri.

L'aspetto gratificante dell'aggressione, nel quale sono incluse sensazioni di superiorità e dominanza, è alla base di tante forme di questo comportamento, ma in particolare della componente edonistica del bullismo e delle forme psicopatiche e brutali di violenza. Nella società moderna, dove il bisogno di cibo è soddisfatto al supermercato, la mancanza del senso di soddisfazione che viene dall'uccisione di una preda può essere colmata da attività ricreative come caccia e pesca.

L'aspetto gratificante dell'aggressione, nel quale sono incluse sensazioni di superiorità e dominanza, è alla base di tante forme di questo comportamento, ma in particolare della componente edonistica del bullismo e delle forme psicopatiche e brutali di violenza

Differenze tra i sessi

Il singolo fattore predittivo più importante del comportamento aggressivo è il sesso della persona. Secondo le statistiche del 2018 del Federal Bureau of Prisons degli Stati Uniti, i detenuti sono per il 93 per cento maschi. L'associazione tra comportamenti aggressivi e genere maschile è evidente nel regno animale, dimostrando che la relazione tra violenza e sesso ha una forte base biologica. Un ampio contributo viene dalle influenze ormonali sui circuiti neurali che controllano i comportamenti aggressivi, ma le pressioni selettive sui maschi, specialmente nei mammiferi sociali, inclusa la maggior parte dei primati, hanno promosso caratteri che aumentano la probabilità dei comportamenti aggressivi nella ricerca dei partner, per salire di status sociale, procurarsi il cibo e difendere il territorio e la tribù.

David Anderson, neuroscienziato del California Institute of Technology, e colleghi hanno studiato il circuito neurale che spiega la sconcertante associazione tra sesso e violenza. Le loro ricerche hanno svelato parte del meccanismo tramite cui gli stessi circuiti cerebrali possono essere coinvolti in sentimenti opposti come amore e odio. Dal punto di vista fisiologico, ci sono molti aspetti in comune tra aggressione e accoppiamento. Entrambi evocano intensi stati di eccitazione e, quando hanno successo, un potente senso di ricompensa. Nel mondo naturale, aggressione e accoppiamento sono spesso collegati tra loro, ed entrambi sono regolati da influenze esterne e stati corporei interni simili. Gli animali maschi, per esempio, sono più aggressivi nella stagione dell'accoppiamento.

È noto da tempo che anche l'accoppiamento è controllato dall'area d'attacco nell'ipotalamo e che la stimolazione con elettrodi impiantati in questa sede può indurre la copulazione o l'aggressione. Sfruttando la colorazione della proteina Fos per identificare neuroni molto attivi, alcuni ricercatori hanno trovato che alcune cellule dell'ipotalamo sono diventate attive subito dopo che i topi hanno iniziato un'aggressione o un accoppiamento. Mentre faceva parte del laboratorio di Anderson prima di diventare professoressa all'Università di New York, Dayu Lin ha impiantato microelettrodi nell'ipotalamo di topi e ha scoperto che c'erano neuroni attivi nella lotta e nell'accoppiamento; alcuni neuroni scaricavano in un comportamento, altri nell'altro, ma c'erano anche neuroni attivati in entrambi i casi. Inserendo fibre ottiche tramite cui inviare un fascio laser che ha attivato neuroni geneticamente modificati per generare impulsi elettrici in risposta alla luce, Lin e colleghi hanno spronato il topo ad attaccare o a copulare. Gli scienziati hanno usato il laser in modo da far scaricare i neuroni a frequenze diverse e a passare da un comportamento all'altro.

Perdere il controllo

Usare questi nuovi dati di laboratorio come aiuto per capire una strage è ancora un obiettivo ambizioso. Ma un episodio accaduto più di cinquant'anni fa potrebbe aver messo in moto un ambito di ricerca che un giorno potrebbe scongiurare certi tremendi titoli di giornale. Il 1° agosto 1966 Charles Whitman, un tormentato ex Marine, pugnalò la madre e le sparò, uccidendola, poi andò a casa della moglie e la uccise a coltellate, per infine raggiungere una torre del campus dell'Università del Texas ad Austin con un bauletto contenente tre coltelli, 700 cartucce e sette armi da fuoco. Dalla sua postazione di cecchino, Whitman uccise 14 persone e ne ferì un'altra trentina; inoltre, il killer lasciò un biglietto in cui chiese di studiare il suo cervello dopo la morte per determinare se fosse malato di mente.

L'autopsia del cervello di Whitman trovò un piccolo tumore, un glioblastoma multiforme, vicino all'amigdala. Nel referto, il gruppo di esperti ammetteva: «Il tumore cerebrale altamente maligno plausibilmente potrebbe aver contribuito alla sua incapacità di controllare le proprie emozioni e azioni»; ma non fu in grado di determinare in modo conclusivo che il cancro avesse qualcosa a

Oggi tecniche come la risonanza magnetica permettono di studiare le basi cerebrali dei comportamenti violenti.

Aberration Films Ltd/SPL/AGF

che fare con la strage commessa da Whitman o con la sua apparente malattia mentale. Dopotutto molte persone soffrono di lesioni cerebrali senza diventare violente e assassine.

Finora non è stato trovato nulla di anormale nel cervello dell'autore della strage di Las Vegas, Stephen Paddock, e forse non lo si troverà mai. Ma se anche dovesse emergere qualche malattia, continuerà a essere impossibile stabilire una relazione di causa ed effetto tra un tumore cerebrale e un crimine tanto efferato. In più, le statistiche del MacArthur Violence Risk Assessment Study indicano che le persone con disturbi mentali non hanno maggiori probabilità rispetto alle altre di essere violente.

È probabile è che nel cervello del cecchino del Mandalay Bay non si troveranno anomalie neurologiche. I principali fattori di rischio che predicono comportamenti violenti sono giovane età, sesso maschile, abuso di sostanze e basso status socio-economico. Secondo un'analisi del 2003 condotta da Heather Stuart, della Queen's University, nell'Ontario, in Canada, un terzo degli atti violenti autodichiarati da persone senza diagnosi di malattie mentali e sette crimini violenti dei malati di mente su dieci sono associati all'abuso di sostanze. Le nostre conoscenze su come alcool o cocaina compromettono i circuiti neurali del comportamento aggressivo lascia pochi dubbi sul rapporto tra abuso di sostanze e violenza.

Nuove comprensioni

Il comitato di esperti che esaminò il cervello di Whitman espresse una motivazione più ampia per la propria incapacità di collegare il tumore cerebrale al delitto: in parole povere, aveva a che fare con l'insufficiente comprensione scientifica di base del cervello nel 1966. «L'applicazione delle attuali conoscenze scientifiche alla funzione organica del cervello non ci permette di spiegare le azioni compiute da Whitman il 1° agosto», venne osservato nel referto. «Questo caso è un'indicazione impressionante dell'urgente necessità di una maggiore comprensione delle funzioni cerebrali legate ai comportamenti, in particolare a quelli aggressivi e violenti».

Nel 1966 non esisteva la macchina per la risonanza magnetica, e l'intero campo delle neuroscienze era ai suoi primi passi. Ricerche più recenti, che usano tecniche moderne per esplorare le nuove neuroscienze alla base dei comportamenti di aggressione stanno producendo conoscenze che avrebbero potuto aiutare Whitman nel suo bisogno di risposte definitive.

Lo psichiatra Bernard Bogerts, dell'Università Otto von Guericke di Magdeburgo, in Germania, e i suoi colleghi hanno usato *imaging* a risonanza magnetica e tomografia computerizzata per esaminare il cervello di detenuti violenti e non violenti. La loro ricerca ha trovato un'incidenza significativamente più elevata di anomalie cerebrali nei criminali violenti rispetto ai non violenti e a un gruppo di controllo. Per esempio, il 42 per cento dei 162 detenuti violenti aveva almeno un'area anomala rispetto al 26 per cento dei 125 non violenti e all'8 per cento dei 52 soggetti del gruppo di controllo. Le patologie apparivano nella corteccia prefrontale, nell'amigdala e in altre regioni responsabili del controllo dell'amigdala e dell'ipotalamo.

Le informazioni scoperte sui circuiti neurali dell'aggressione potrebbero indicare la strada verso nuove risposte, ma possono anche sollevare nuove domande. Geni ed esperienza guidano entrambi lo sviluppo dei circuiti neurali in modo diverso per ciascun individuo, una spiegazione delle differenze nell'intensità e nei tipi di comportamento aggressivo che si osservano negli esseri umani o nei roditori impigati negli esperimenti. Negli esseri umani la corteccia prefrontale non si sviluppa pienamente prima dei vent'anni di età, indicando il motivo per cui i più giovani non dovrebbero essere considerati penalmente responsabili come gli adulti negli Stati Uniti.

La lentezza del processo di sviluppo neurale ci fornisce qualche indizio biologico, per esempio sulle ondate apparentemente incomprensibili di stragi con armi da fuoco che scuotono le scuole degli Stati Uniti. In ultima analisi, potrebbe diventare plausibile intervenire per ridurre i comportamenti violenti regolando i circuiti neurali del comportamento aggressivo con farmaci, chirurgia di precisione, stimolazione cerebrale o altri metodi.

Le prove che stanno emergendo riguardo ad anomalie neurologiche tra le persone detenute per comportamenti violenti sollevano questioni etiche di capacità giuridica e ci fanno domandare se gli accertamenti psichiatrici della salute mentale dei pazienti debbano includere elettroencefalogrammi e scansioni cerebrali con cui cercare tracce di malattia. Forse era questo che desiderava Whitman quando riempì il suo bauletto e scrisse l'ultimo biglietto, in cui chiedeva che il suo cervello venisse esaminato dopo il bagno di sangue che stava per commettere. ■

PER APPROFONDIRE

Functional Identification of an Aggression Locus in the Mouse Hypothalamus. Lin D. e altri, in «Nature», Vol. 470, pp. 221-226, 10 febbraio 2011.

Ventral Premammillary Nucleus as a Critical Sensory Relay to the Maternal Aggression Network. Motta S.C. e altri, in «Proceedings of the National Academy of Sciences», Vol. 110, n. 35, pp. 14.438-14.443, 27 agosto 2013.

High Prevalence of Brain Pathology in Violent Prisoners: A Qualitative CT and MRI Scan Study. Schiltz K. e altri, in «European Archives of Psychiatry and Clinical Neuroscience», Vol. 263, pp. 607-616, ottobre 2013.

Why We Snap: Understanding the Rage Circuit in Your Brain. Fields R.D., Dutton, 2016.

Orgoglio e violenza. Baumeister R.F., in «Le Scienze» n. 392, aprile 2001.

AMBIENTE

Tropico del Mediterraneo

di Roberto Danovaro

A rischio per il caldo. Alcuni pesci scorrazzano in una prateria di *Posidonia* non lontano dalla costa di Cabo de Palos, in Spagna. Ambienti mediterranei come questo sono a rischio a causa del riscaldamento globale.

Gli effetti del riscaldamento globale sono sempre più evidenti anche nelle acque del Mediterraneo, con conseguenze negative su biodiversità ed ecosistemi

Roberto Danovaro è un ecologo che studia biodiversità e funzionamento degli ecosistemi marini e l'impatto dei cambiamenti climatici sugli organismi marini. È professore di biologia marina all'Università Politecnica delle Marche e presidente della Stazione zoologica «Anton Dohrn» di Napoli. Ha ricevuto numerosi premi internazionali: BMC Biology (Londra), medaglia della Società francese di oceanografia (Parigi), premio ENI Protezione dell'ambiente.

I cambiamenti climatici stanno modificando le caratteristiche fisiche e chimiche del mare, stanno alterando il metabolismo e i cicli riproduttivi di un gran numero di organismi e sconvolgendo gli equilibri tra le specie marine. Questi cambiamenti non sono omogenei dal punto di vista geografico, sono invece distribuiti «a macchia», ovvero cambiano tra diverse latitudini e si concentrano in alcune regioni, tra cui il Mar Mediterraneo.

Inoltre, contrariamente a quello che si pensava fino a poco tempo fa, gli effetti dei cambiamenti climatici si stanno espandendo in modo rapido dalla superficie alle profondità dei mari. Nell'intervallo compreso tra 200 e 11.000 metri di profondità si trovano ecosistemi che formano il più grande bioma della Terra, cioè una gigantesca porzione della biosfera che ospita forme di vita. Questi ecosistemi profondi, privi di luce e quindi senza fotosintesi occupano oltre il 65 per cento della superficie terrestre e ospitano oltre il 90 per cento degli organismi marini. Dunque il loro ruolo è fondamentale non solo per l'enorme biodiversità che contengono ma anche per la capacità di rinnovare nel tempo la produzione degli oceani. In particolare, gli abissi sono i principali motori di rigenerazione dei nutrienti inorganici necessari ad alghe e piante marine per la loro crescita.

Nella maggior parte degli ecosistemi profondi le condizioni ambientali sono assai costanti nel tempo (cioè cambiano a scale geologiche), quindi l'impatto dei cambiamenti può essere molto importante, colpendo soprattutto gli organismi caratterizzati da una crescita lenta e una tarda maturazione sessuale.

Oceano in miniatura

Il Mar Mediterraneo sta sperimentando un forte cambiamento, ed è stato proposto come un «oceano in miniatura» da usare in qualità di modello con cui prevedere le risposte degli oceani ai cambiamenti del clima. Semichiuso tra Gibilterra a ovest e il Bosforo a est, questo mare rappresenta meno dell'1 per cento della superficie degli oceani globali e contiene lo 0,3 per cento delle acque. È una sorta di enorme lago salato, con una profondità media di circa 1450 metri (contro i 3750 metri dell'oceano). Dato che è poco profondo, le sue acque si riscaldano a tassi superiori rispetto a quelli di ogni altro oceano. La maggior parte degli organismi marini che ospita è «peciloterma», ovvero la temperatura corporea di questi esseri viventi è identica a quella dell'ambiente marino circostante, di conseguenza i pecilotermi hanno un metabolismo che cambia con il cambiare della temperatura dell'ambiente.

Il Mediterraneo è anche una delle aree in cui molti effetti dei cambiamenti climatici sono già documentati. La temperatura superficiale sta aumentando con certezza dagli anni sessanta, e dalla fine degli anni novanta si sono verificati di frequente episodi di sovrariscaldamento delle acque superficiali con conseguenti ingenti perdite di *benthos*, le forme di vita che vivono a stretto contatto con il fondo marino. Non è necessario essere ricercatori per rendersi conto dei cambiamenti in atto. Basta andare al mare.

Ne ho avuto prova qualche estate fa in Sicilia, quando di prima mattina in spiaggia ho visto correre un enorme granchio che poi è scomparso in una buca. Si trattava di un granchio fantasma, una specie tipicamente tropicale. La spiaggia era costellata di buche, ovvero di imboccature per le tane di questi granchi sbarcati da pochi mesi in Italia e pronti a diffondersi ulteriormente a nord. Insieme ai granchi fantasma, anche una grande varietà di pesci tro-

Seaphotoart/Alamy Stock Photo (*pagine precedenti*)

IN BREVE

Mari e oceani stanno risentendo del riscaldamento globale, e uno dei bacini che più avverte le conseguenze di questa influenza è quello del Mediterraneo.

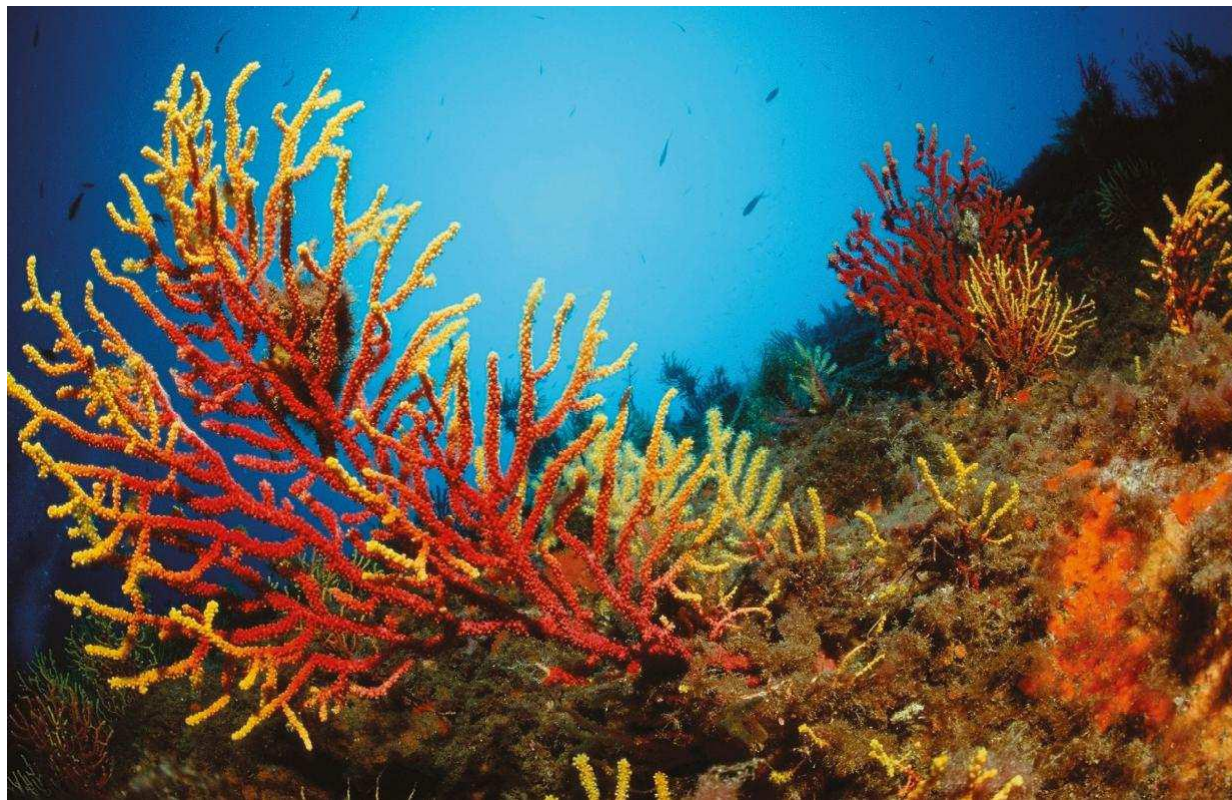
Le sue caratteristiche chimico-fisiche stanno cambiando in risposta a un aumento della temperatura media delle acque sia superficiali sia profonde, causando una diminuzione della biomassa alla base della rete alimentare, un aumento dell'acidità, un calo dell'ossigeno disciolto.

L'aumento delle temperature rende inoltre il Mediterraneo adatto alla proliferazione di specie marine aliene.

Tutti questi effetti, uniti ad altri sempre di origine antropica, mettono a rischio molti ecosistemi mediterranei, che hanno un valore ecologico fondamentale e anche un importante ruolo economico.

Grandi morie estive

Durante l'estate le condizioni del Mar Mediterraneo, caratterizzate da alte temperature e scarsa disponibilità di cibo, portano a una «dormienza estiva» in molte specie di organismi filtratori come le spugne o i bivalvi e a condizioni di stress per molte specie di coralli e gorgonie. Prolungati periodi di temperature elevate e anomale possono causare mortalità di massa di invertebrati bentonici. A partire dal 1999 in alcune aree oltre l'80 per cento delle gorgonie e spugne è morto in poche settimane. Condizioni di stress da caldo eccessivo rendono gli organismi più vulnerabili a malattie e infezioni batteriche: nel Mar Ligure molte gorgonie, come *Paramuricea clavata*, sono morte a causa di infezioni da batteri chiamati vibrioni. Alcuni parassiti della ghiandola digestiva sembrano essere alla base di ingenti morie di bivalvi giganti, come *Pinna nobilis*, e di grandi cernie. Il recupero di queste specie dopo simili eventi richiede generalmente tempi lunghi, e dopo tre anni le colonie sopravvissute o neo-reclutate mostrano ancora una taglia molto inferiore a quella precedente l'evento di mortalità.

ARCO/P. Sutter/AGF

picali, come il pesce lepre, il pesce balestra e il pesce istrice, sta entrando nel Mediterraneo e riempie le reti dei pescatori di Calabria, Puglia e Sicilia. Questi pesci alieni, ovvero provenienti da altri mari, sono una prova evidente dell'effetto dei cambiamenti climatici in corso. Le specie aliene tropicali prendono d'assalto il bacino mediterraneo perché trovano condizioni favorevoli, sono abituate a climi caldi e quindi stanno meglio delle specie locali e autoctone stressate dal caldo eccessivo.

Il Mediterraneo ospita circa 17.000 specie, pari al 7,5 per cento della biodiversità marina globale. Si stima che 1000 di queste specie siano aliene e provengano da Oceano Atlantico, Mar Rosso o altri bacini esotici; entrano attraverso lo stretto di Gibilterra o il Canale di Suez, ampliato di recente, o trasportate sulle carene o nelle acque di zavorra delle navi. Molte specie aliene però sono rilasciate da acquariofili, che per esempio decidono di non tenere più «Nemo» nell'acquario e lo liberano in mare, magari all'Isola d'Elba, dove sono stati trovati esemplari di pesce pagliaccio; oppure sono state introdotte per compensare la scomparsa di una specie autoctona, come nel caso della vongola filippina al posto di quella verace in Adriatico. Una volta nel Mediterraneo, grazie a condizioni ambientali sempre più simili a quelle tropicali, molte specie aliene trovano casa e si stabiliscono in modo permanente. Così però competono con le specie autoctone o le predano, determinandone in alcuni casi l'allontanamento, riducendone l'abbondanza od obbligandole a scendere a profondità maggiori per limitare i danni.

Alcuni esempi sono l'alga *Caulerpa cylindracea*, specie aliena che forma estesi tappeti e compete per lo spazio soprattutto con altre macroalghe e piante endemiche come la *Posidonia*, e la medusa *Rhopilema nomadica*, che misura oltre 60 centimetri e trasforma ampi tratti di mare in una sorta di gelatina.

Sempre più caldo

In generale, nei mari la temperatura diminuisce in modo evidente con l'aumentare della profondità, e il Mediterraneo non fa eccezione. Tuttavia il nostro mare è molto più caldo rispetto ad altri mari e oceani alle stesse latitudini, con temperature superfi-

ciali che possono raggiungere i 30 gradi Celsius in estate, come all'equatore. Ma, a differenza degli oceani, nel Mediterraneo le temperature abissali non sono mai inferiori a circa 13 gradi. Sono valori superiori di circa 10 gradi rispetto a quelli dell'Oceano Atlantico al largo di Gibilterra e a quelli di tutti gli oceani alle stesse profondità. Questo rende la fauna mediterranea differente rispetto a quella degli altri oceani: c'è un'elevata frazione di specie endemiche, ovvero esclusive di questo bacino.

Il Mediterraneo però si sta riscaldando sia in superficie, dove la temperatura è aumentata anche di oltre 1,8 gradi negli ultimi decenni, per esempio in Adriatico, sia nelle acque profonde, dove è aumentata di 0,2 gradi negli ultimi vent'anni. Nel caso degli oceani, le previsioni attuali indicano che a profondità abissali (ovvero tra 3000 e 6000 metri di profondità) le temperature potranno aumentare fino a 1 grado nei prossimi ottant'anni. Ma il dato più allarmante è che il tasso di riscaldamento degli ultimi vent'anni è almeno doppio rispetto a quello dei quarant'anni precedenti.

Il tasso di riscaldamento del Mediterraneo è superiore a quello di ogni altro oceano

Tutto questo non avverrà senza conseguenze. I cambiamenti di temperatura possono influenzare la biodiversità del mare in modo evidente e su grandi scale spaziali. I principali problemi per le specie che abitano nel Mediterraneo sono dovuti proprio al limite della tolleranza termica. Le specie con affinità per le acque più fredde, originarie delle latitudini più elevate, sono in difficoltà di fronte a un repentino cambiamento di temperatura, e possono anche soccombere con fenomeni di mortalità di massa in periodi di caldo estremo e prolungato (*si veda il box a p. 56*).

Un aumento di temperatura dell'acqua ha effetti anche su ciclo vitale, longevità e tasso metabolico degli organismi marini. Le specie che vivono in ambienti tropicali e sono già adattate alle alte temperature si stanno espandendo, mentre quelle che preferiscono le basse temperature sono in difficoltà e vedono contrarsi il periodo utile per il ciclo riproduttivo. L'aumento della temperatura può alterare anche la distribuzione delle specie, spingendole verso profondità maggiori dove trovano refrigerio, e può causare l'estinzione di specie vulnerabili a basse profondità. Il mare profondo, inoltre, è caratterizzato da temperature stabili nei millenni; tollera poco brusche variazioni di temperatura come quelle registrate negli ultimi anni.

E possono entrare in gioco anche fenomeni climatici anomali. Come quello denominato «transiente», che negli anni novanta nel Mediterraneo orientale ha innescato un repentino sprofondamento di acque superficiali più calde e più salate, che a loro volta hanno spinto le acque profonde ricche di sali nutritivi verso la superficie. In pochi mesi questo processo ha causato un forte cambiamento della diversità, portando a una sostituzione di circa il 50 per cento delle specie presenti a 1000 metri di profondità, e dimostrando così che anche gli ambienti profondi possono cambiare rapidamente a causa di anomalie climatiche.

Rischio carestia

Uno dei primi effetti dei cambiamenti climatici è l'alterazione della produzione primaria globale, ovvero della quantità di biomassa, in larga parte composta da alghe microscopiche, che rappresenta la base della rete alimentare (o trofica) marina. Secondo i modelli ecologici, nei prossimi decenni la produzione di biomassa vegetale alle medie latitudini e nei tropici potrà diminuire anche del 50 per cento. Questo calo causerà una sorta di progressiva «carestia» per i pesci e per gli altri organismi consumatori, limitandone la possibilità di crescere e riprodursi con ripercussioni sulla pesca in tutto il mondo.

La vita nel mare profondo dipende in larga misura dalla pioggia di materia organica prodotta per fotosintesi nella zona superficiale e illuminata. Normalmente l'apporto di materia organica verso il fondo diminuisce esponenzialmente con l'aumento della profondità a causa del consumo della materia organica durante la discesa. Ma oltre a ridurre la produzione primaria il riscaldamento delle acque superficiali sta creando una barriera fisica (di densità) più forte tra acque superficiali più calde e acque profonde più fredde, riducendo l'entità di questa pioggia verso i fondali.

Gli effetti più negativi del riscaldamento in superficie sono attesi per l'Oceano Indiano, dove entro la fine del secolo si prevede una diminuzione fino al 55 per cento del rifornimento alimentare che raggiunge il fondo oceanico. Ma anche il Mediterraneo soffrirà per questo fenomeno, soprattutto nel bacino orientale, dove le condizioni di limitazione alimentare sono già evidenti. Il Mediterraneo orientale è tra gli ambienti più poveri di cibo del pianeta. In quell'area l'apporto di alimenti dalla colonna d'acqua può essere da 15 a 80 volte minore rispetto a quello del bacino occidentale.

Con la riduzione del cibo disponibile via via che si scende verso gli abissi, diminuiscono drasticamente biodiversità e biomassa, con effetti più forti alle profondità più grandi. La scarsità di cibo avrà diversi effetti negativi, riducendo crescita, sopravvivenza e reclutamento degli organismi che vivono nei fondali. Gli organismi di grosse dimensioni, come la megafauna, ovvero di taglia compresa tra alcuni centimetri e molti metri di lunghezza, per esempio grandi gorgonie, coralli e grandi predatori come gli squali, saranno i primi a subire l'impatto di questi cambiamenti, mentre le specie più piccole e le componenti microbiche riusciranno a trarne beneficio.

Attenzione all'ossigeno

Un altro problema che devono affrontare le specie marine in un mondo più caldo riguarda la respirazione. La solubilità dell'ossigeno nell'acqua dipende dalla temperatura dell'acqua stessa. In particolare, all'aumentare della temperatura si riduce la quantità di ossigeno che si può disciogliere in acqua. Per questa ragione, a causa del riscaldamento globale aree sempre più ampie degli oceani stanno diventando sempre più povere di ossigeno, ovvero ipossiche: meno di 0,5 millilitri di ossigeno per litro di acqua. Le concentrazioni di ossigeno normali in acqua di mare (circa 10 millilitri di ossigeno per litro) sono già 20 volte inferiori rispetto alla concentrazione di ossigeno in aria (circa 200 millilitri per litro d'aria), e solo pochissimi organismi specializzati sono in grado di sopravvivere in condizioni di scarsità di questa molecola.

Il risultato è che regioni estese degli oceani si stanno spopolando, e questo sta generando un forte impatto sui processi biogeochimici. Questi fenomeni non sono stati ancora osservati nel Mediterraneo, con l'eccezione di alcuni casi di ipossia verificatasi nell'alto Adriatico e legati a condizioni di particolare riscaldamento e stratificazione delle masse d'acqua. Tuttavia, non possiamo escludere che in futuro l'aumento della temperatura possa rendere più probabile la creazione di aree ipossiche.

I (bio)costruttori del mare

Gli ingegneri dell'ecosistema marino sono organismi che con la loro azione modificano l'ambiente e aumentano la complessità strutturale dell'habitat, modificando anche biomassa e biodiversità locale, con molti effetti ecologici specifici. Tra questi organismi possono essere inclusi:

- Coralli, gorgonie, ostriche, gasteropodi vermetidi, vermi serpulidi e sabellidi e alghe coralline costruiscono strutture tridimensionali (scogliere) di carbonato di calcio e così forniscono il substrato per l'insediamento di altri organismi che vi trovano cibo o rifugio dai predatori.
- Molte piante marine (per esempio la *Posidonia*) e numerose macroalghe formano praterie o foreste di vegetazione in aree costiere; in questo modo cambiano il flusso dell'acqua, accumulano sedimenti, permettono l'insediamento di larve e forniscono cibo e rifugio dalla predazione.
- I molluschi bivalvi, per esempio cozze e vongole, creano letti solidi su sedimenti sabbiosi o rocciosi, aumentandone la complessità, depositando materia organica che diventa cibo per molti organismi, fertilizzando i sedimenti e promuovendo la crescita di piante marine.
- Pesci malacantidi, cernie, vongole, anfipodi, crostacei escavatori (callianassidi), oloturie e molti vermi possono scavare lunghe tane, a volte di profondità anche di metri.
- Le tartarughe marine erbivore brucano le praterie di piante fanerogame come la *Posidonia* e le mantengono sane e rigogliose.

mgokalp/iStock

Tra gli effetti diretti del calo di ossigeno c'è una diminuzione della sopravvivenza embrionale di specie ovipare, ovvero che depongono uova fecondate per riprodursi. Sono a rischio anche le specie di profondità, per esempio il pescecane portoghese *Centroscymnus coelolepis*, importante per il Mediterraneo e con una distribuzione quasi globale, perché vivono lungo i margini continentali a oltre 500 metri dalla superficie, dove in genere si verificano le condizioni di ipossia.

Mare acido

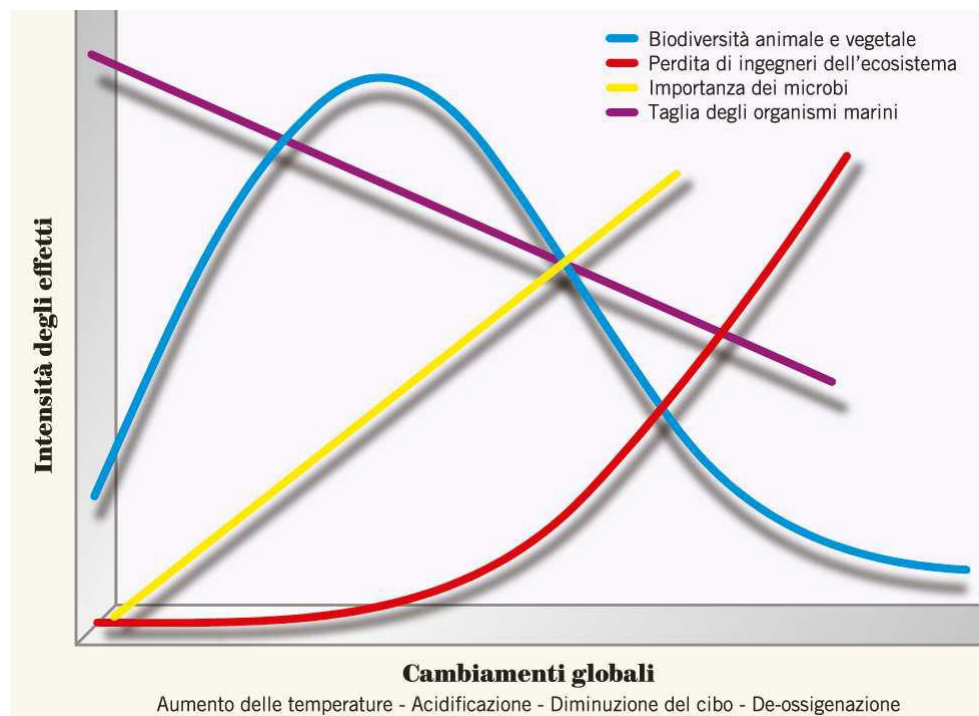
Dato che i mali non vengono mai da soli, a completare il quadro dei cambiamenti che colpiscono mari e oceani abbiamo sempre più prove pure di una loro acidificazione. Si tratta di una diminuzione del pH delle acque marine superficiali che procede al tasso di circa 0,1 unità, o anche di più, per decennio (la scala del pH va da 0, che equivale alla massima acidità, a 14); questa acidificazione è dovuta alla quantità sempre più abbondante di anidride carbonica presente in atmosfera, prodotta dalle attività umane, che si scioglie in acqua formando acido carbonico.

Non ci sono aree del nostro pianeta immuni al problema, e il Mediterraneo è una delle regioni marine più sensibili. Il suo pH è diminuito in media fino a 0,16 unità rispetto ai livelli preindustriali. Questo tasso di diminuzione è tre volte più alto di quello registrato sulla superficie di molte aree oceaniche superficiali. Ma non finisce qui. Uno studio durato tre anni e condotto nello stretto di Gibilterra ha documentato una progressiva diminuzione del pH anche in acque intermedie e profonde.

L'impatto dell'acidificazione sui cicli biogeochimici marini e sugli organismi inizia a essere ben documentato grazie a studi di laboratorio e sul campo. Il principale problema di questo fenomeno è il rischio di veder scomparire specie calcificanti: bassi valori del pH hanno effetti negativi sul tasso di crescita, riproduzione e resistenza ai cambiamenti ambientali di molte specie che producono scheletri calcarei. In generale però la sensibilità degli organismi marini all'acidificazione varia a seconda della specie. Mentre alcune possono rimanere quasi indifferenti, altre subiscono conseguenze gravi dalla diminuzione di pH.

Possono essere interessate in maniera significativa anche specie importanti dal punto di vista economico. Per esempio il corallo rosso, *Corallium rubrum*, che si trova da pochi metri dalla superfi-

L'impatto dei cambiamenti sugli organismi

Questa illustrazione mostra l'impatto atteso sugli organismi marini del Mediterraneo in seguito ai cambiamenti globali. Si nota un aumento della decalcificazione con perdita esponenziale di ingegneri dell'ecosistema, e progressiva diminuzione della taglia degli organismi, mentre aumenta l'importanza dei microrganismi. La biodiversità mostra una curva a forma di gobba, con valori inizialmente crescenti all'aumentare delle temperature per effetto dell'ingresso di specie aliene, a cui segue un collasso per effetto delle morie di massa causate da temperature eccessivamente alte.

cie fino a oltre 1000 metri di profondità. Si tratta di una specie longeva, che vive oltre 200 anni, e per la quale la diminuzione del pH riduce il processo di calcificazione. Entro il 2100, dunque, l'acidificazione potrebbe portare a rischio di estinzione organismi che già popolano le nostre acque.

Habitat da proteggere

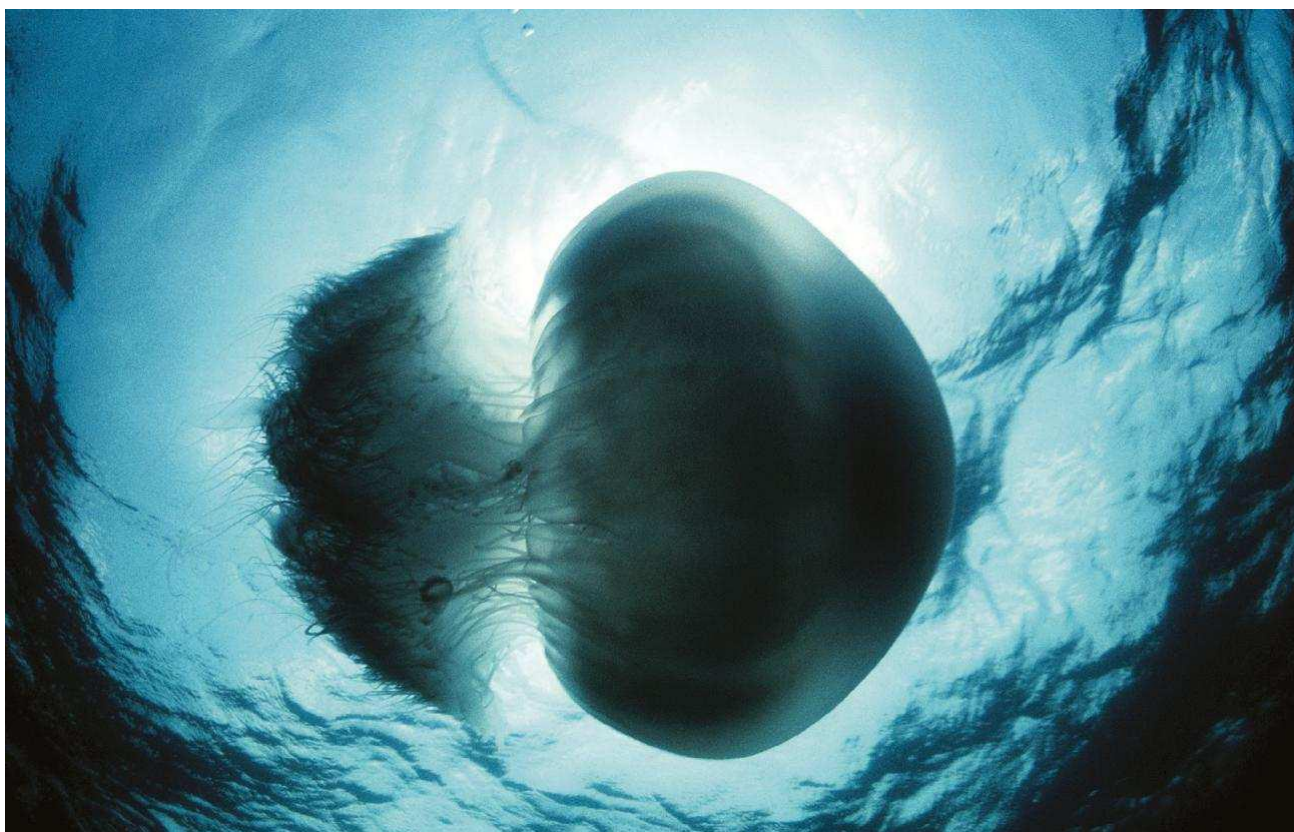
Se allarghiamo lo sguardo, passando da singole specie o diversi tipi di organismi agli habitat, la situazione non migliora, anzi. Molti habitat del Mediterraneo sono estremamente vulnerabili ai cambiamenti climatici anche per effetto della combinazione di più fattori. Un esempio sono le foreste di macroalghe brune dell'Adriatico settentrionale, del Mar Ligure e dello Stretto di Messina, che richiedono basse temperature e quindi non tollerano il riscaldamento delle acque. Altri esempi sono l'habitat coralligeno costiero e quello dei coralli profondi: entrambi a rischio perché popolati da coralli di acque fredde, sensibili all'aumento di temperatura e all'acidificazione. L'aumento della temperatura, inoltre, sembra mettere in pericolo tutti gli ambienti di grotta, in particolare le grotte leggermente più profonde, interessate dall'ingresso di acque calde superficiali.

Anche le comunità dei margini continentali e dei canyon profondi, che rappresentano circa il 20 per cento della superficie oceanica mondiale e sono estremamente abbondanti nel Mediterraneo, sono a rischio in caso di aumento di eventi climatici anomali. Per esempio, a causa dell'intensificazione eventi come le cascate di acque densa che si verificano lungo i margini e spazzano via le comunità dei fondali rocciosi queste comunità non hanno possibilità di fuga, perché sono in gran parte sessili, ovvero vivono ancorate a un substrato. Tra gli habitat marini vulnerabili ai cambiamenti climatici vanno citati pure quelli formati dai cosiddetti biocostruttori. Molti organismi che formano biocostruzioni sono considerati «ingegneri dell'ecosistema» perché generano nuovi habitat che ospitano molte forme di vita. La perdita di questi biocostruttori, specie fortemente sensibili alle variazioni di temperatura e all'acidificazione, può dunque avere effetti a cascata sulla biodiversità marina (*si veda il box a p. 55*).

Proteggere gli ecosistemi marini è tuttavia un impegno fondamentale. Essi svolgono un ruolo importante per gli esseri umani, che solo in parte può essere quantificato e apprezzato. Forniscono una serie di beni, come il pescato e altre risorse naturali, o di servizi, come la produzione di ossigeno o la protezione delle coste da erosione e inondazioni, che sono necessari per sostenere il nostro attuale stile di vita e il nostro benessere. È difficile stimare il valore economico degli ecosistemi marini. Nel caso del Mediterraneo, calcoli recenti indicano in oltre 500 miliardi di euro il valore annuale delle sole risorse biologiche (ovvero principalmente la pesca) per le economie dei paesi di questo bacino. Sono beni che vanno tutelati, poiché solo un Mediterraneo sano e ricco di biodiversità è in grado di resistere all'impatto dei cambiamenti climatici e dell'azione degli esseri umani.

Quale futuro?

Gli effetti negativi dei cambiamenti climatici si sommano a quelli di altri impatti, anche questi di origine antropica, aumentandone gli effetti. Da oltre dieci anni nel Mar Mediterraneo è stata proibita la pesca sotto i 1000 metri di profondità, ma non sempre i divieti sono rispettati. La pesca è eccessiva per la maggior

Danilo Sossi (*su indi*)

Gli esemplari di medusa *Rhopilema nomadica*, specie aliena del Mediterraneo, possono trasformare ampi tratti di mare in una sorta di gelatina.

Peter Scoones/SPL/AGF

parte delle specie di interesse commerciale e, fatto non meno grave, in molti casi provoca la distruzione degli habitat. Inquinamento chimico e aumento di plastica e spazzatura, inoltre, contribuiscono a delineare un quadro ambientale a rischio di collasso. Lo sviluppo di nuove tecnologie per il mare aperto permette di estrarre metalli rari e preziosi dai fondali marini causandone tuttavia la distruzione.

Ma se anche fossimo in grado di fermare questi impatti diretti resterebbero quelli indiretti, legati ai cambiamenti globali che stanno modificando profondamente il Mar Mediterraneo. Questi mutamenti stanno alterando reti trofiche, cicli biogeochimici, distribuzione biogeografica delle specie marine e loro cicli vitali. Inoltre stanno causando l'estinzione locale di alcune specie e la sostituzione di specie locali con specie aliene e invasive. Gli effetti dei cambiamenti saranno indubbiamente diffusi, e avranno impatti sull'economia, influenzando specie di interesse commerciale. E potrebbero rivelarsi più forti di quelli previsti alterati fino a oggi a causa dell'interazione tra temperatura, ossigeno e pH. Il rischio è che tra il 2050 e il 2100 potremmo assistere a una complessiva perdita di beni e servizi ecosistemici (per esempio pesca, produzione di ossigeno, cattura di anidride carbonica).

Per evitare questo scenario lugubre sarà necessario avviare il restauro degli ecosistemi marini che sono andati distrutti. In questo senso sono già in corso studi pilota, come quelli che fanno parte di MERCES, un progetto finanziato dall'Unione Europea per definire i protocolli di restauro dei diversi habitat sia costieri che profondi. Altre iniziative europee attualmente in corso, come il progetto IDEM, hanno come obiettivo la valutazione dello stato di salute degli ambienti marini profondi, i meno conosciuti tra gli ambienti del Mediterraneo, pure in risposta ai cambiamenti climatici in corso. E più in generale c'è una strategia marina dell'Unione Europea, la Marine Strategy Framework Directive, definita per sollecitare gli Stati membri a raggiungere un buono stato di tutela ambientale fino a 200 miglia nautiche dalla linea di costa entro il 2020.

Se però riusciremo a ripristinare gli ecosistemi marini, migliorare la qualità ambientale e proteggere la biodiversità, anche rafforzando la consapevolezza della necessità di proteggere il mare, renderemo certamente gli ecosistemi marini meno vulnerabili ai cambiamenti climatici attuali e più resilienti, ovvero in grado di recuperare con più velocità le loro condizioni originali, anche se sono stati danneggiati. Sono obiettivi importanti, perché il Mediterraneo non è solo il nostro presente, ma anche, soprattutto, il nostro futuro. ■

PER APPROFONDIRE

The Deep-Sea Under Global Change. Danovaro R., Corinaldesi C., Dell'Anno A. e Snelgrove P.V., in «Current Biology», Vol. 27, n. 11, pp. R461-R465, 2017.

Marine Extinctions. Patterns and Processes. Boero F., Carlton J., Briand F. e altri, in «CIESM Workshop Monographs», Vol. 45, pp. 5-19, 2013.

Climate Influence on Deep Sea Populations. Company J.B., Puig P., Sardà F., Palanques A., Latasa M. e Scharek R., in «PLoS ONE». Vol. 3, n. 1, e1431, 2008. **doi: 10.1371/journal.pone.0001431.**

Biodiversity Issues For the Forthcoming Tropical Mediterranean Sea. Bianchi C.N., in «Hydrobiologia», Vol. 580, pp. 7-21, 2007.

Biologia marina: biodiversità e funzionamento degli ecosistemi marini. Danovaro R., UTET, Milano, seconda edizione, 2019.

SALUTE PUBBLICA

Dengue e disastri

Una reazione immunitaria incontrollata potrebbe aver reso pericoloso un vaccino contro questa malattia

di Seema Yasmin e Madhusree Mukerjee

IN BREVE

La dengue, trasmessa dalle zanzare, è una malattia che colpisce almeno 400 milioni di persone ogni anno nel mondo. La maggior parte dei contagiati nota appena la prima infezione, mentre una seconda può rivelarsi fatale.

Una vecchia teoria controversa, chiamata potenziamento dipendente dall'anticorpo (ADE), spiega perché la seconda infezione di dengue può diventare molto più letale della prima. Nuovi studi sostengono questa teoria.

Il primo vaccino mai approvato per la dengue sembra imitare un'iniziale infezione della malattia e potrebbe peggiorare la seconda infezione. Il ruolo dell'ADE in questo fenomeno rimane controverso.

Getty Images

La zanzara *Aedes aegypti* trasmette diversi virus pericolosi, tra cui quattro che causano la dengue. Il primo attacco di dengue di solito è leggero, ma il secondo può rivelarsi fatale, e questa è una peculiarità che forse crea problemi al primo vaccino approvato per questa malattia.

Nel dicembre 2015 il presidente delle Filippine Benigno Aquino III e altri hanno negoziato un accordo con la casa farmaceutica Sanofi per l'acquisto di tre milioni di dosi di Dengvaxia, il primo vaccino approvato contro la dengue. Il progetto era vaccinare un milione di alunni di nove anni con tre dosi di vaccino ciascuno, per proteggerli dalle conseguenze peggiori della malattia: shock, collasso degli organi interni e morte.

Seema Yasmin è direttrice della Stanford Health Communication Initiative alla Stanford University, dove insegna giornalismo scientifico e *storytelling* per la sanità globale. Ha vinto un Emmy Award come scrittrice e reporter, oltre a essere medico abilitato, e scrive spesso per «Scientific American».

Madhusree Mukerjee è *senior editor* di «Scientific American» per i temi legati a scienza e società.

1

Esistono quattro varietà del virus della dengue, tutte trasmesse dalle femmine delle zanzare *Aedes*, in particolare *A. aegypti*, che succhiano il sangue durante il giorno, quando le persone non sono protette dalle zanzariere. Negli ultimi cinquant'anni questi virus, stretti parenti di quelli della febbre West Nile, della febbre gialla e di Zika, si sono diffusi a ondate nelle regioni tropicali e subtropicali del mondo, aumentando di 30 volte l'incidenza della dengue e colpendo oltre 390 milioni di persone ogni anno.

Non tutti coloro che sono infettati da un virus della dengue si ammalano: tre persone su quattro tra quelle punte dalle zanzare infette sono asintomatiche. Le altre possono soffrire sintomi appartenenti a uno di tre gruppi: una febbre simile a quella di molte altre malattie virali; la «febbre dengue», che è accompagnata da mal di testa, dolore dietro agli occhi, dolori alle articolazioni e alle ossa e, in casi rari, emorragie interne; e la versione grave della malattia con febbre emorragica da dengue e sindrome da shock da dengue. Nei casi gravi il plasma esce dai capillari, si forma un accumulo di liquidi attorno agli organi, ne conseguono massicce emorragie interne, e cervello, reni e fegato iniziano a collassare. Un rapido ricovero in ospedale e una corretta gestione dei casi possono salvare vite, e spesso questo avviene, ma ogni anno muoiono di dengue più di 20.000 persone. Molti sono bambini.

La dengue fa paura, e da decenni gli operatori sanitari nei paesi in via di sviluppo aspettano un vaccino. Ma quando l'internista Antonio Dans e la pediatra Leonila Dans, entrambi epidemiologi clinici al Manila College of Medicine dell'Università delle Filippine, hanno letto la notizia della campagna di vaccinazione di Aquino sul quotidiano «Philippine Star», la prima cosa che li ha colpiti è stato il costo. Con un prezzo di 3 miliardi di pesos (57,5 milioni di dollari) solo per la fornitura, la campagna di vaccinazione con Dengvaxia sarebbe costata più di tutto il programma nazionale di vaccini per il 2015, che copriva polmonite, tubercolosi, poliomielite, difterite, tetano, pertosse, morbillo, orecchioni e rosolia. Avrebbe raggiunto meno dell'1 per cento dei circa 105 milioni di residenti nel paese. E anche se si stimava che in media nelle Filippine ne morissero circa 750 persone all'anno, la dengue non rientrava neanche tra le prime dieci cause di mortalità. Tra le malattie infettive, polmonite e tubercolosi mietevano molte più vittime.

Leggendo con attenzione una relazione provvisoria dei ricercatori di Sanofi Pasteur (il dipartimento di Sanofi dedicato ai vaccini) sulle sperimentazioni cliniche del Dengvaxia, Dans e Dans hanno trovato altri motivi di preoccupazione. Tra i bambini asiatici dai due ai cinque anni, quelli che avevano ricevuto il vaccino avevano una probabilità sette volte maggiore rispetto ai bambini non vaccinati di essere ricoverati per dengue grave nei tre anni dopo l'inoculazione. Un'analisi attenta dei dati ha rivelato che, sebbene in media il Dengvaxia fosse più sicuro nei bambini più grandi, era statisticamente impossibile escludere la possibilità che per alcuni bambini peggiorasse la situazione.

Nel marzo 2016 Dans e Dans, e altri professionisti del settore medico, hanno scritto all'allora ministro della salute Janette Garin, facendo notare che il vaccino poteva essere rischioso per alcuni bambini e che forse le Filippine non avevano abbastanza operatori sanitari qualificati per monitorare gli eventuali effetti nocivi su così tante persone. Un vaccino potenzialmente più sicuro era in via di sviluppo e probabilmente valeva la pena aspettare, sostenevano.

Lo stesso mese, però, lo stimato gruppo consultivo sui vaccini dell'Organizzazione mondiale della Sanità (OMS), che fornisce le linee guida sulle pratiche di vaccinazione ai paesi, ha affermato in un documento informativo su Dengvaxia che i ricoveri in ospedale di bambini inoculati, se osservati nell'arco di più anni, non era-

Paolo Harris Paz (1 e 2)

2

A Managua, in Nicaragua, un bambino si sottopone a un prelievo di sangue (*1*) per uno studio ad ampio raggio sulla dengue. Un altro bambino (*2*) guarda la strada nel suo quartiere.

no statisticamente significativi. «Non sono stati identificati altri segnali di sicurezza in alcuna fascia d'età» al di sopra dei cinque anni, si leggeva. C'era una «possibilità teorica» che Dengvaxia potesse essere pericoloso per alcuni bambini, ed erano necessari ulteriori studi per evitare che la cosa potesse «compromettere la fiducia pubblica» nel vaccino. Ma doveva «essere introdotto come parte del programma di vaccinazioni di routine nei contesti appropriati», che includevano regioni dove il 70 per cento e oltre della popolazione era già affetto dalla dengue, dove la vaccinazione dei preadolescenti poteva ridurre i ricoveri ospedalieri fino al 30 per cento su un periodo di trent'anni. In un successivo documento programmatico il gruppo affermava che il vaccino era sicuro per i bambini a partire dai nove anni, per i quali lo si raccomandava.

A posteriori, Dans e Dans non sono sorpresi che le autorità abbiano deciso di ignorare le loro preoccupazioni. «Dovevano scegliere se credere a noi o all'OMS», spiega Antonio Dans. «Al loro posto anch'io avrei creduto all'OMS. Noi chi eravamo? Semplici insegnanti di una piccola suola di medicina». A quanto pare le autorità filippine erano così convinte della sicurezza di Dengvaxia da non obbligare Sanofi Pasteur a presentare i risultati degli studi di farmacovigilanza, che di solito verificano la sicurezza di un nuovo farmaco o vaccino in condizioni locali. L'inserimento di un nuovo prodotto farmaceutico nel programma sanitario nazionale di solito richiedeva dai tre ai cinque anni di tempo, afferma Anthony Leachon, già presidente del Philippine College of Physicians (l'ordine dei medici delle Filippine), ma il programma di vaccinazione contro la dengue è stato avviato subito, nell'aprile 2016.

Pochi giorni dopo veniva segnalato il primo decesso post-vaccinazione, quello di un bambino con una malattia cardiaca congenita. In una conferenza stampa Garin ha spiegato che la morte non era collegata a Dengvaxia. Ma Dans e Dans hanno continuato per mesi a parlare con la stampa e hanno postato su Facebook un video in cui, sulla base di una contestatissima teoria risalente a decenni prima chiamata «potenziamento dipendente dall'anticorpo» (ADE, dall'inglese *antibody-dependent enhancement*), si avvertiva che nei bambini che non erano mai stati affetti da dengue in precedenza il vaccino poteva rendere più letale del solito un successivo contagio da dengue. Garin ha risposto a sua volta con un avvertimento: i medici che avessero preso parte alla «disinformazione» su Dengvaxia sarebbero stati responsabili di ciascuna morte per dengue che si sarebbe potuta prevenire con il vaccino.

Le cose sono rimaste così fino al novembre 2017, quando Sanofi Pasteur ha pubblicato a sua volta un avvertimento: Dengvaxia non doveva essere somministrato agli individui che non erano mai stati contagiati dalla dengue. Un mese dopo l'OMS ha pubblicato nuove linee guida in cui raccomandava il vaccino solo a chi avesse «un precedente contagio di dengue documentato». A dicembre le Filippine hanno fermato il programma di vaccinazione, mentre genitori e stampa reagivano con furia, recriminazioni e altre segnalazioni di decessi di bambini. A quel punto erano già stati vaccinati più di 830.000 bambini in età scolare. A settembre 2018, secondo il Dipartimento di sanità, 154 dei bambini che avevano ricevuto Dengvaxia erano morti per varie malattie. La stragrande maggioranza di quei decessi non erano collegati al vaccino, ma osservazioni cliniche e analisi del sangue hanno confermato che in 19 casi le morti sono state causate dalla dengue.

Sanofi Pasteur afferma che le morti nelle Filippine potrebbero dipendere dall'incapacità del vaccino di proteggere una piccola

parte dei soggetti inoculati. Al contrario, alcuni esperti sostengono, come Dans e Dans avevano già fatto, che Dengvaxia imiterebbe un incontro precedente con la dengue, il che può portare il corpo a rispondere in modo pericoloso a un secondo contagio.

La controversia non ha rallentato il lancio di Dengvaxia, che attualmente è approvato in più di 20 paesi. Nell'ottobre 2018 la Food and Drug Administration statunitense ha annunciato che avrebbe accelerato la procedura di esame per la richiesta di Sanofi Pasteur per l'approvazione di Dengvaxia. Ciò significa che il vaccino potrebbe essere approvato negli Stati Uniti per l'uso in zone dove la dengue è endemica, come Portorico, prima che le Filippine abbiano completato l'inchiesta sulle morti dei bambini vaccinati e prima che Sanofi Pasteur abbia pubblicato la relazione finale sui sei anni di sperimentazione clinica.

Una malattia sconcertante

Per la maggior parte dei virus, come il morbillo, il secondo attacco, nei rari casi in cui si verifica, è molto più leggero rispetto al primo. Con la dengue, invece, il secondo attacco ha molte più probabilità di essere letale. Scienziati e medici hanno faticato per anni per capirne i motivi. Negli anni cinquanta e sessanta, quando in Asia iniziarono a insorgere epidemie di dengue in forma grave, si erano chiesti se non si trattasse di un'infezione del tutto nuova. La dengue che conoscevano costringeva i pazienti a letto e li lasciava affaticati, mentre questa nuova manifestazione li mandava all'ospedale o all'obitorio. C'era stata una mutazione del virus? Oppure era colpa del sistema immunitario?

Per la maggior parte dei virus il secondo attacco, nei rari casi in cui si verifica, è molto più leggero rispetto al primo

Tra coloro che cercavano una risposta c'era un giovane ricercatore appena uscito dalla facoltà di medicina. Scott B. Halstead iniziò a studiare i virus trasmessi dalle zanzare nel 1957, quando lavorava per l'esercito statunitense in Giappone, e affrontò la sua prima grande epidemia di dengue quattro anni più tardi, quando era di stanza in un laboratorio militare adiacente all'Ospedale pediatrico di Bangkok. I medici pensavano che i ragazzi portati all'ospedale fossero stati avvelenati; ne moriva quasi uno su quattro. Con il gruppo di ricerca che guidava, Halstead identificò la dengue come causa dell'epidemia. In seguito avrebbe fatto un'altra scoperta ancora più sconcertante: i bambini infettati dalla dengue per la seconda volta (con un virus diverso ogni volta) e i neonati di madri immuni a questa malattia erano maggiormente a rischio di dengue grave e morte. Nessuno capiva perché.

Nel 1964 R.A. Hawkes, all'epoca ricercatore all'Australian National University di Canberra, scoprì che nelle colture cellulari i virus dell'encefalite di Murray Valley, della febbre West Nile e dell'encefalite giapponese e il virus getah infettavano più cellule quando erano mescolati ad anticorpi che quando erano da soli. Hawkes ipotizzò che gli anticorpi rendessero più stabile il virus e ne aumentassero la capacità di attaccarsi alle cellule. Halstead si chiedeva se stesse succedendo lo stesso con la dengue.

Per capire perché fossero necessari due contagi diversi di dengue per rendere letale il secondo, Halstead infettò 118 scimmie con diverse combinazioni dei quattro virus della dengue e poi misurò la quantità di virus che avevano nel sangue. Pubblicò i risultati nel 1973: alcune scimmie, che erano state infettate una seconda volta e con un virus diverso, presentavano cariche virali molto più alte. Quattro anni più tardi propose una possibile spiegazione, che chiamò potenziamento dipendente dall'anticorpo.

Facciamo un esempio: la prima volta il contagio avviene con il virus chiamato DENV-1. Gli anticorpi contro quel virus possono restare nel sangue per decenni, anche per tutta la vita. Quando avviene un secondo contagio con un altro virus della dengue, per esempio DENV-2, 3 o 4, paradossalmente gli anticorpi contro DENV-1 potrebbero accelerare la replicazione del nuovo virus nelle cellule infette, affrettando un attacco potenzialmente letale.

Il meccanismo ADE, in seguito ulteriormente chiarito da Halstead e da altri ricercatori, funziona così: un virus della dengue è una stringa di acido ribonucleico chiusa in una capsula proteica che presenta una serie di protuberanze caratteristiche sulla superficie. Durante il primo contagio di dengue, i linfociti B del sistema immunitario producono un anticorpo chiamato immunoglobulina G, o IgG, che si attacca a una o più protuberanze. Dopo essersi attaccati ai virus, gli anticorpi possono consegnarlo a certe cellule del sistema immunitario, come i macrofagi. Il suffisso «-fagi» deriva dalla parola greca che significa «mangiare»: i macrofagi sono letteralmente i «grandi mangiatori», inglobano il virus e lo digeriscono tramite enzimi. Così, quando il virus della dengue è legato agli anticorpi, normalmente è intrappolato e distrutto nei macrofagi.

Quando l'infezione finisce, alcuni linfociti B produttori di anticorpi restano dormienti. Se si verifica un secondo contagio con un altro virus della dengue, si risvegliano e producono gli stessi anticorpi della prima volta. Halstead ipotizzò che alcuni di questi anticorpi possano comunque attaccarsi alla superficie dei virus sconosciuti, ma spesso non ne bloccano le protuberanze più letali, che potremmo chiamare le loro armi. Gli anticorpi consegnano gli intrusi ai macrofagi, ma senza averli disinnescati. Ciò permette al virus di bloccare il sistema di difesa del macrofago e di prendere il controllo della cellula, di cui poi usa le risorse per replicare se stesso in tante copie. Con l'aiuto involontario degli anticorpi, la nuova varietà di dengue si riproduce, producendo 1000 volte più copie di quanto farebbe da sola.

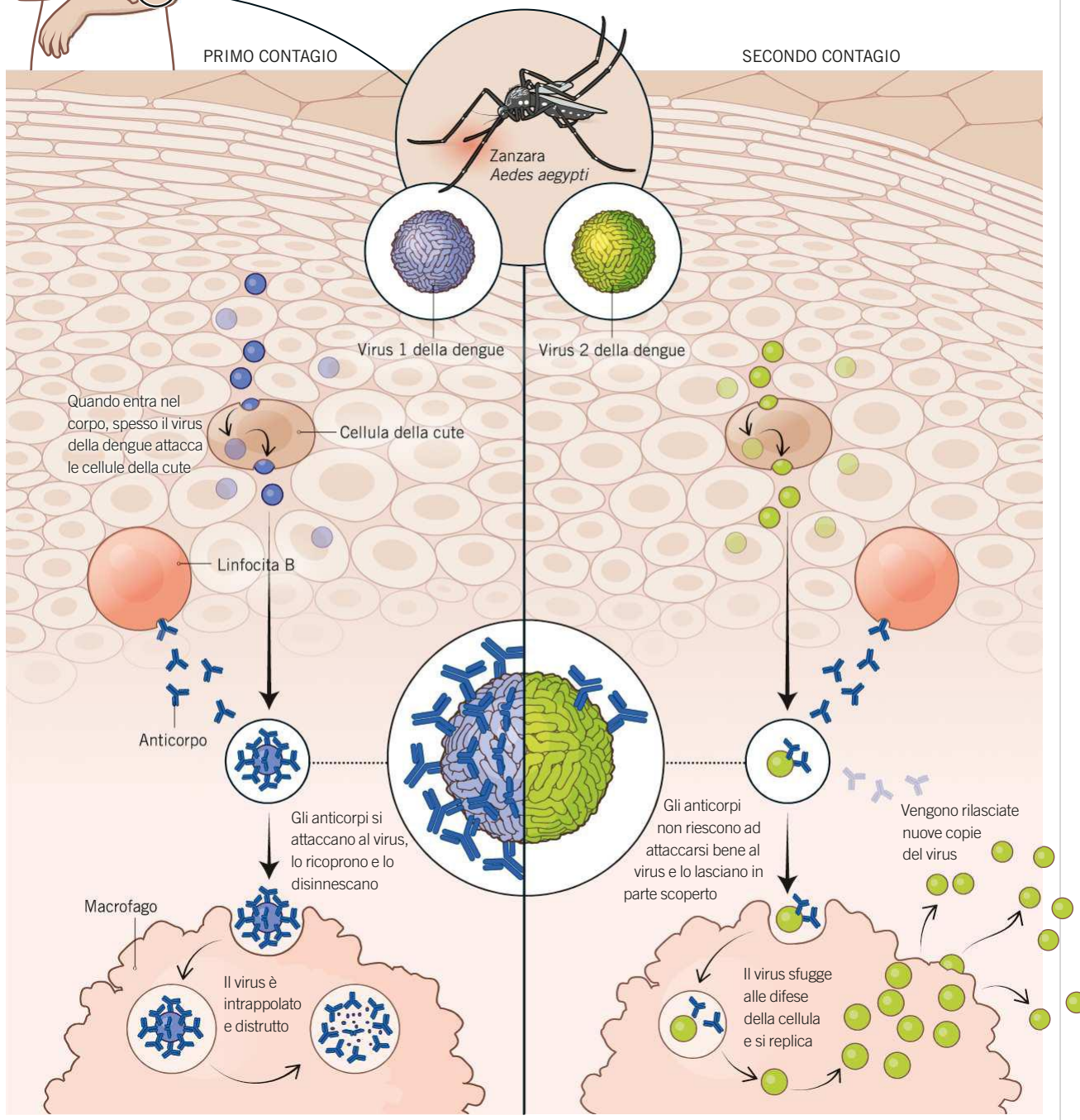
Halstead ricorda che quando ipotizzò l'ADE le reazioni dei colleghi furono un misto di indifferenza e incredulità. Oggi, a 89 anni, è professore a contratto presso la Uniformed Services University of the Health Sciences a Bethesda, nel Maryland, dove continua a portare avanti la sua posizione. Molti esperti di dengue lo descrivono come il padrino dell'ADE. «All'epoca credevo di aver fatto una scoperta molto importante – racconta – ma nessuno voleva credere che l'ADE esistesse davvero».

Più di quarant'anni dopo Eva Harris, un'esperta di dengue dell'Università della California a Berkeley, ha trovato prove che l'ADE non solo esiste, ma contribuisce ad attacchi di dengue in forma grave nei bambini. Harris non aveva intenzione di dimostrare né di smentire l'esistenza di questo meccanismo: inizialmente era scettica al riguardo e non aveva particolarmente voglia di invischiarsi in un dibattito pluridecennale. Il suo gruppo, che usava anche modelli statistici elaborati da Leah Katzelnick, studiava come la dengue colpisce i bambini. Per portare avanti lo studio i ricercatori hanno contribuito all'installazione di un laboratorio in Nicaragua e hanno iniziato un progetto scientifico dei più difficili: uno studio di coorte a lungo termine su pazienti in età pediatrica. A Managua, la capitale del Nicaragua, Harris e colleghi avevano il compito non facile di seguire migliaia di bambini.

Per più di 15 anni gli scienziati che collaboravano al Nicaraguan Pediatric Dengue Cohort Study hanno curato i bambini am-

Come gli anticorpi possono peggiorare la dengue

La dengue è causata da quattro virus imparentati tra loro e trasmessi dalle zanzare del genere *Aedes*. Una teoria chiamata potenziamento dipendente dall'anticorpo, elaborata negli anni settanta da Scott B. Halstead, prova a spiegare perché un secondo attacco di dengue, legato a un virus diverso, è più fatale del primo. La prima infezione, per esempio con il virus 1 della dengue, induce i linfociti B a produrre anticorpi, che ricoprono i virus e li consegnano a leucociti come i macrofagi, i quali li intrappolano e distruggono. Poi i linfociti B diventano quiescenti, per risvegliarsi in caso di seconda infezione e ricominciare a produrre gli stessi anticorpi. Ma gli anticorpi per il virus 1 non si legano bene, per esempio, con il virus 2. Continuano a consegnare gli invasori ai macrofagi, ma in un modo che permette al virus di evitare la distruzione e di prenderne il controllo. Così i virus usano i meccanismi della cellula per replicarsi e inondare il corpo, rilasciando una proteina che danneggia i vasi sanguigni, causando un attacco di dengue grave.

Illustrazione di Tami Tolpa

malati e sono andati nelle loro case per raccogliere dati e campioni di sangue. Su 6684 soggetti, hanno trovato 618 casi di bambini che avevano sofferto di dengue e quasi 50 che avevano sviluppato la malattia in forma grave. Studiando gli oltre 41.000 campioni di sangue prelevati nel corso di più di 12 anni, hanno fatto una scoperta notevole. I bambini con una specifica concentrazione di anticorpi (non abbastanza bassa da essere inutile, non abbastanza alta da offrire protezione, ma a un livello medio) avevano un rischio quasi otto volte maggiore di contrarre la febbre emorragica da dengue e la sindrome da shock da dengue.

L'ADE spiega questi risultati con facilità. Se all'inizio gli anticorpi non ci sono o sono presenti con densità bassissime, non possono potenziare un successivo contagio da dengue e causare un attacco grave. Se gli anticorpi sono presenti con densità alte (come avviene subito dopo il contagio iniziale), riescono a coprire qualsiasi nuovo virus della dengue in modo sufficiente per disabilitarlo e permettere ai macrofagi di ucciderlo. Ma se la concentrazione di anticorpi si colloca in quella che per Harris è la «zona di pericolo», né bassa né alta, possono favorire l'ingresso del virus nei macrofagi senza disinnescarlo, accelerandone la riproduzione.

L'articolo in cui Harris ha descritto i risultati, pubblicato su «Science», è stato, nelle parole di Jean Lim, virologa della statunitense Icahn School of Medicine at Mount Sinai, uno «studio da fuoriclasse» che ha fatto cambiare idea ad alcuni dei più decisi oppositori dell'ADE. Le sue scoperte inattese potrebbero anche aver portato alla soluzione del mistero del vaccino.

Secondo Sanofi Pasteur, il vaccino «imita in parte il primo contagio e aumenta il rischio di dengue grave durante i contagi successivi»

Un segnale d'allerta

Per una strana casualità, proprio pochi giorni dopo la pubblicazione dell'articolo di Harris, nel novembre 2017, Sanofi Pasteur ha fatto l'annuncio che ha scatenato l'ira dei genitori filippini: non usate Dengvaxia se non avete già sofferto di dengue. Un mese più tardi anche l'OMS si è allineata sulla stessa posizione, affermando che solo chi poteva dimostrare di aver già sofferto di dengue in passato doveva ricevere il vaccino.

Era la stessa cosa che Halstead ripeteva da marzo 2016, quando aveva pubblicato un'analisi su «Vaccine» sostenendo che Dengvaxia potesse causare danni. Forse in chi non aveva mai sofferto di dengue il vaccino operava come un primo contagio, generando nel corpo proprio quella quantità di anticorpi che, agendo da cavalli di Troia, in caso di contagio reale poteva portare alla forma grave della malattia. Era meno probabile che i bambini piccoli fossero già stati infettati dalla dengue, perciò era più probabile che per loro il vaccino operasse come primo contagio. Inoltre rispetto agli adulti i bambini avevano anche più probabilità di contrarre la dengue in forma grave con un secondo contagio (come osservato da Halstead e altri quando un secondo virus della dengue invase Cuba nel 1981). Il problema era che non c'era modo di capire facilmente quali bambini fossero negativi alla dengue prima di ricevere Dengvaxia, perché Sanofi Pasteur non aveva raccolto queste informazioni su tutti i soggetti prima di vaccinarli.

«Non mi piace dire "te l'avevo detto" – afferma Harris – ma c'era da aspettarselo». In varie riunioni e lunghe teleconferenze aveva fatto notare ai ricercatori di Sanofi Pasteur che non raccoglievano il tipo di dati necessari per valutare la possibilità del vaccino di mettere a rischio vite umane. Invece di sottoporre tutti i bambini al test per verificare se avessero sofferto di dengue prima di inocularli con Dengvaxia, Sanofi Pasteur lo faceva solo con il 10-20 per cento dei soggetti. L'azienda sostiene di essersi dovuta muovere in un territorio inesplorato e di aver seguito i migliori protocolli noti alla scienza dei vaccini. «Prelevare sangue solo al 10-20 per cento dei soggetti è la routine in molte sperimentazioni di vaccini», dice Su-Peing Ng, responsabile medica globale di Sanofi Pasteur.

Quando è venuto alla luce il preoccupante tasso di ricoveri, i ricercatori non potevano più fare i prelievi alle migliaia di bambini che avevano partecipato ai trial clinici per verificare le loro condizioni relative alla dengue prima dell'inoculazione: i bambini erano già stati vaccinati. Sanofi Pasteur ha collaborato con l'Università di Pittsburgh per sviluppare un metodo con cui testare i bambini che avevano ricevuto il vaccino per cercare tracce di un precedente contagio. Questa rivalutazione è stata la base dell'avvertimento pubblicato dall'azienda nel novembre 2017, per cui solo chi aveva già sofferto di dengue avrebbe dovuto ricevere Dengvaxia.

Le raccomandazioni precedenti si basavano sui risultati preliminari dei trial clinici, secondo cui Dengvaxia era sicuro per i bambini più grandi. Ma come rivelato dai nuovi test l'età faceva un po' da indicatore di un precedente contagio. I bambini di nove anni hanno più probabilità di aver già contratto la malattia rispetto a quelli di 2-3 anni, soprattutto nelle zone dove la dengue è endemica, quindi in media il vaccino per loro dovrebbe essere sicuro. Però né l'età del bambino né l'endemicità della malattia sono indicatori sicuri per determinare chi abbia già sofferto di dengue: l'unico modo per saperlo con certezza è fare le analisi del sangue. «In un gruppo di bambini di nove anni ce ne saranno sempre alcuni che non hanno mai avuto la dengue», spiega Halstead.

L'esperto ha comunicato i suoi dubbi all'OMS in modo pubblico. In un articolo sul «Journal of Infectious Diseases» del dicembre 2016 ha sostenuto che un'affermazione del principale gruppo consultivo sui vaccini dell'OMS fosse sbagliata. Il gruppo aveva affermato che il rischio di ospedalizzazione per i bambini dai due ai cinque anni raggiunge il massimo nel terzo anno dopo la vaccinazione e poi «svanisce». Halstead sosteneva che i risultati delle sperimentazioni più a lungo termine di Sanofi Pasteur contraddicevano quella affermazione. Dopo aver analizzato indipendentemente i dati dei trial, Dans, Dans e altri hanno pubblicato un articolo sul «Journal of Clinical Epidemiology» in cui affermavano che «non esiste un fondamento biologico per fissare all'età di nove anni una soglia» oltre cui si possa presumere che Dengvaxia sia sicuro.

L'OMS ha però confermato la propria decisione di raccomandare il vaccino ai bambini più grandi che vivono nei paesi più gravemente colpiti dalla malattia. «La revisione effettuata è stata estremamente approfondita, trasparente e in conformità con le nostre procedure pubblicate», afferma Joachim Hombach, consulente sanitario *senior* del Dipartimento immunizzazioni, vaccini e sostanze biologiche dell'OMS. «Sono state discusse diverse opzioni di raccomandazione possibili e quella pubblicata nel 2016 è stata la posizione su cui il comitato consultivo ha raggiunto il consenso».

La controversia continua

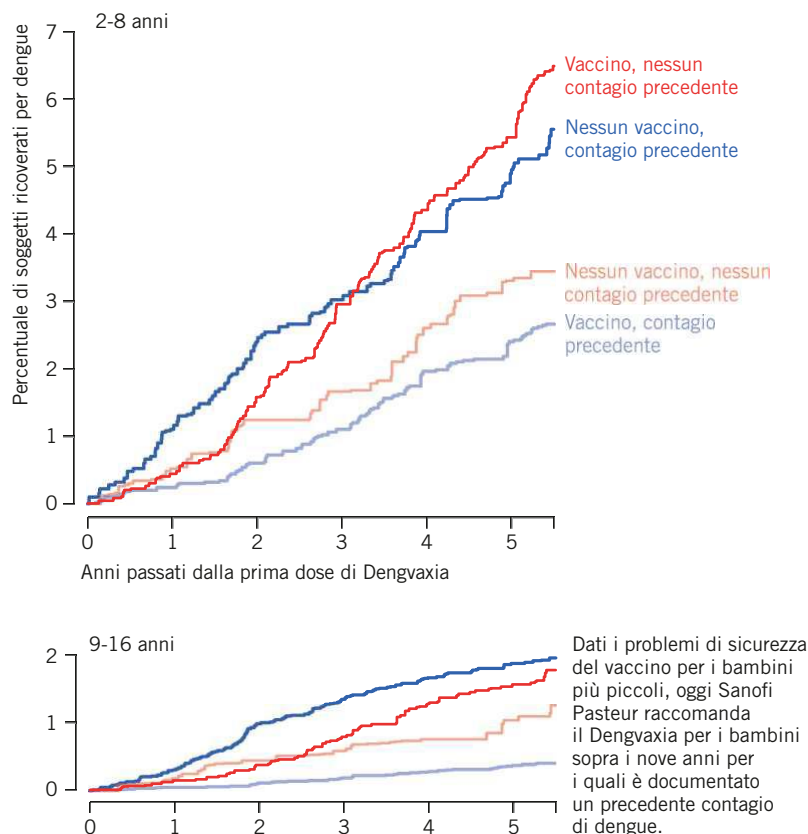
Nel luglio 2018 Sanofi Pasteur ha pubblicato sul «New England Journal of Medicine» una nuova analisi sui dati delle sperimentazioni cliniche con il metodo sviluppato a Pittsburgh. I risultati confermavano un rischio maggiore di dengue in forma grave e

I RISULTATI

Quanto è sicuro Dengvaxia?

Con un nuovo test appena sviluppato, i ricercatori di Sanofi Pasteur hanno scoperto quali dei bambini che hanno partecipato alle sperimentazioni cliniche su Dengvaxia, il primo vaccino mai approvato contro la dengue, avessero contratto un'infezione da dengue prima dell'inoculazione. Così hanno scoperto che se un bambino era già stato infettato in passato (*linee blu*), il vaccino era molto efficace nel proteggerlo dall'ospedalizzazione per dengue. Se invece il bambino non presentava segni di una precedente infezione (*linee rosse*), rispetto ai bambini non vaccinati della stessa età, allora aveva molte più probabilità di essere ricoverato con un grave attacco di febbre da dengue anni dopo il vaccino. L'effetto era molto più netto nei bambini più piccoli (*grafico in alto*), che comunque hanno più probabilità di sviluppare attacchi di dengue grave rispetto ai bambini più grandi (*grafico in basso*).

Dati i problemi di sicurezza del vaccino per i bambini più piccoli, oggi Sanofi Pasteur raccomanda il Dengvaxia per i bambini sopra i nove anni per i quali è documentato un precedente contagio di dengue.

Fonte: *Effect of Dengue Serostatus on Dengue Vaccine Safety and Efficacy*, di Sridhar S. e altri, in «New England Journal of Medicine», Vol. 379, n. 4, 26 luglio 2018

di ricovero ospedaliero per i bambini «sieronegativi» (quelli il cui sangue non presentava tracce di precedenti infezioni da dengue) che avevano ricevuto il vaccino rispetto a quelli che non l'avevano ricevuto. «Il vaccino imita in parte il primo contagio e aumenta il rischio di dengue grave durante i contagi successivi», hanno scritto i ricercatori. Sebbene i sostenitori dell'ADE avessero previsto questi risultati, l'articolo affermava che «i meccanismi immunopatogenetici alla base di questi risultati restano ignoti».

Halstead ritiene che i ricercatori di Sanofi Pasteur «non riescano ad accettare» le prove che derivano dalle loro stesse sperimentazioni. Ng risponde che il modo preciso in cui l'ADE favorisce il contagio non è ancora stato dimostrato negli esseri umani. «L'ADE è più che altro un'osservazione fatta in laboratorio, *in vitro*. Non l'abbiamo vista dimostrata clinicamente negli esseri umani», afferma. «Non sappiamo se il meccanismo fondamentale sia l'ADE o no». Ng sostiene inoltre che l'effetto generale di Dengvaxia sulla salute pubblica sia comunque benefico. Secondo Sanofi Pasteur, nei bambini a partire dai nove anni e che hanno già sofferto di dengue, Dengvaxia riduce circa dell'80 per cento il tasso di attacchi in forma grave della malattia e di ricovero ospedaliero. Per ragioni ancora non chiarite, sembra che due attacchi di dengue diano l'immunità alla malattia per tutta la vita. In senso stretto, il vaccino è utile solo a chi si è ammalato già una volta ma non due.

Ng non è l'unica a mettere in discussione il fatto che l'ADE sia il meccanismo principale alla base della versione potenzialmente fatale della dengue. Duane Gubler, direttore fondatore del Dipartimento dedicato alla dengue degli statunitensi Centers for Disease Control and Prevention (CDC) e professore emerito all'Emerging Infectious Diseases Program della Duke-NUS Medical School di Singapore, sostiene che i virus DENV-2 e DENV-3 siano stati associati in passato a focolai di dengue nella sua forma grave. Se le cose stanno così, il tipo di virus potrebbe essere importante almeno quanto l'ADE nel determinare il corso dell'infezione. Alan Rothman, professore di biologia cellulare e molecolare all'Università del Rhode Island, sostiene che i linfociti T, che richiamano e attivano i macrofagi e secernono sostanze infiammatorie, siano più responsabili dell'insorgere della dengue grave rispetto agli anticorpi. Halstead, invece, considera i linfociti T soprattutto come salvatori, perché distruggono i macrofagi infettati dalla dengue. A questo punto il virus potrebbe rilasciare una proteina che danneggia i vasi sanguigni, ma i medici possono comunque salvare il paziente mantenendo sotto controllo i livelli dei fluidi e dando così più tempo ai linfociti T per eliminare il virus.

Verso un vaccino più sicuro

Dato che la dengue contagia circa un milione di persone al giorno e sta comparendo in luoghi in cui non si era mai vista prima, il bisogno di un vaccino sicuro è sempre più pressante. Forti delle nuove informazioni ottenute da Sanofi Pasteur, i nuovi produttori di vaccini contro la dengue si affrettano a dire che loro si sono organizzati diversamente. «Abbiamo progettato la sperimentazione in modo che risponda alla domanda più importante: come funziona in soggetti mai colpiti dalla dengue?», afferma Rajeev Venkayya, direttore della Global Vaccine Business Unit di Takeda Pharmaceutical Company. Attualmente Takeda sta sperimentando il suo vaccino contro la dengue su bambini dai 4 ai 16 anni in

America Latina e in Asia. «Quando abbiamo iniziato la sperimentazione, nel 2016, conoscevamo bene la preoccupazione per questo problema nelle persone mai colpite dalla malattia», spiega Venkayya. «Quindi ci siamo assicurati di avere persone di questo tipo tra i volontari e di raccogliere campioni di sangue di riferimento per il 100 per cento dei partecipanti». A gennaio 2019 Takeda ha annunciato i risultati preliminari delle sperimentazioni cliniche: il vaccino era efficace. Per determinarne in modo completo la sicurezza, invece, probabilmente ci vorrà più tempo.

Sono almeno altri due i vaccini per la dengue in fase di sviluppo, uno prodotto dagli statunitensi National Institutes of Health (NIH) e uno da GlaxoSmithKline. Ci vorranno anni prima che siano approvati, e prima ancora bisogna dimostrare che siano sicuri ed efficaci. Gubler sostiene che sia probabile che qualsiasi vaccino sviluppato possa offrire una buona protezione contro un paio di virus della dengue, ma non funzioni altrettanto bene contro gli altri. «E se le cose stanno così c'è sempre il rischio dell'ADE», continua. «Allora, usiamo questi vaccini, oppure li mettiamo via e aspettiamo altri cinquant'anni finché non ne avremo uno perfetto?» Halstead è molto più ottimista. «Esiste un ottimo vaccino», afferma: quello degli NIH, che, come ha scritto in un articolo, «ha raggiunto praticamente tutti gli obiettivi necessari per dimostrare l'efficacia preclinica e la sicurezza per gli esseri umani», anche se deve ancora essere sottoposto a un'ampia gamma di trial clinici.

Quando la FDA ha annunciato che avrebbe accelerato l'analisi di Dengvaxia, nell'ottobre 2018, il dibattito è diventato ancora più urgente. Per gli Stati Uniti il peso della dengue si sente in territori come Guam, le Isole Vergini statunitensi, Samoa e Portorico, dove Gubler ha lavorato come direttore del Dipartimento dei CDC dedicato a questa malattia. L'esperto è a favore dell'uso del vaccino in luoghi come Portorico, dove secondo lui il sistema di sorveglianza sulla dengue è molto più solido che nelle Filippine, perciò i medici dovrebbero essere in grado di tenere sotto controllo gli individui vaccinati e di garantire un ricovero rapido in ospedale nel caso sviluppino sintomi di una forma più grave. «Sono a favore dell'uso del vaccino senza test preliminari in zone dove la malattia è fortemente endemica, perché ritengo che con una buona sorveglianza e un buona gestione dei casi il rischio di ADE sia minimo», afferma.

È etico mettere in pericolo una minoranza per proteggere la maggioranza, come implicato dall'OMS su Dengvaxia?

Halstead non è d'accordo: «Questo prodotto è dannoso se non somministrato solo a individui sicuramente sieropositivi». Ma per dimostrare un precedente contagio sono necessari esami di laboratorio che in molte zone del mondo colpite da epidemie di dengue non sono sempre disponibili. In un pronunciamento controverso del settembre 2018, l'OMS ha indicato che, pur se rimane preferibile fare prima i test per verificare la presenza di un contagio precedente, quando questo non sia possibile i paesi possono comunque decidere di somministrare Dengvaxia agli individui al di sopra dei nove anni nelle popolazioni con un'endemicità della dengue dell'80 per cento o più.

Quando gli è stato chiesto di spiegare la motivazione etica della raccomandazione, Hombach ha risposto che l'OMS aveva valutato con attenzione pro e contro e che aveva anche sottolineato che una campagna del genere dovrebbe essere abbinata alla «completa trasparenza sui rischi del vaccino per le persone di cui non si conosca lo stato sierologico». Spiegare in modo efficace problematiche così complesse in nazioni etnicamente composite, dove molte persone magari non capiscono la lingua parlata dagli operatori sanitari o non sono capaci di leggere le schede informative, potrebbe però rivelarsi difficile. Sanofi Pasteur ha assunto una posizione più prudente. La portavoce Karen Batoosingh ha affermato che «il vaccino dovrebbe essere a disposizione delle persone già infettate per prevenire infezioni successive» e che l'azienda sta cercando di sviluppare «un nuovo test rapido per la dengue, per assicurare un accesso più ampio al vaccino a tutti coloro che potrebbero trarre beneficio dai suoi effetti protettivi».

Perdita di fiducia

Le ripercussioni del programma di vaccinazione riecheggiano ancora nelle Filippine. Parlando a una commissione d'inchiesta del Senato, Aquino ha spiegato che l'incidenza della dengue nel paese cresceva a velocità preoccupante e che aveva operato nella speranza che Dengvaxia potesse impedire al virus di diffondersi nelle zone urbane densamente popolate. Lo scorso febbraio, però, sia il Senato che la Camera dei Rappresentanti hanno raccomandato che Aquino, Garin e altri alti funzionari siano messi sotto accusa ai sensi di una legge anticorruzione, per irregolarità negli appalti per la fornitura e la somministrazione del vaccino. Le famiglie di una trentina di bambini deceduti hanno avviato procedimenti penali contro Garin e altri funzionari filippini, accusandoli di negligenza e irresponsabilità assimilabili all'omicidio e alla tortura. Quando gli abbiamo chiesto di commentare le circostanze in cui era stata lanciata la campagna di vaccinazione, il sottosegretario alla salute Enrique Domingo ha affermato di aver ricevuto l'incarico solo nel dicembre 2017, dopo che era già iniziato il putiferio, e di non essere personalmente a conoscenza di quanto avvenuto.

Tra paure e sospetti, diverse epidemie di morbillo hanno attraversato le Filippine. A febbraio il paese riferiva di oltre 8400 persone contagiate e più di 130 morti. I genitori avevano troppa paura di vaccinare i figli. Secondo uno studio dell'associazione londinese Vaccine Confidence Project, nel 2018 meno di un terzo dei filippini era fortemente d'accordo con l'affermazione che i vaccini sono importanti, in netto calo rispetto al 93 per cento del 2015. In quello studio, pubblicato su «Human Vaccines & Immunotherapeutics», la direttrice del progetto Heidi Larson e i coautori sostenevano che «clamore mediatico di parte» – in particolare «narrative false mirate a diffamare autorità, scienziati ed enti di regolazione» – e «inchieste del Senato e del Congresso che ricordavano l'inquisizione» avevano indotto panico e perdita di fiducia nei vaccini. Dans, Dans, Halstead e altri si sono uniti per rispondere che diversi fattori hanno contribuito al calo della fiducia, non ultime le dichiarazioni «esagerate» di Sanofi sulla sicurezza di Dengvaxia: «L'indignazione è stata il risultato della perdita di fiducia, non la causa».

Quando «Scientific American» ha chiesto se stesse offrendo argomentazioni ai No-Vax, Halstead ha risposto che negli anni novanta è stato cofondatore della Children's Vaccine Initiative, che in seguito è diventata Gavi, una partnership globale di soggetti pubblici e privati che ha lo scopo di favorire l'accesso alla vaccinazione per i bambini dei paesi poveri. «Ho una reputazione affermata come sostenitore dei vaccini e della vaccinazione», ha detto.

Mentre gli scienziati combattono tra loro, i genitori dei bambini vaccinati non riescono a dormire la notte, secondo Antonio Dans. «Le madri sono molto preoccupate, e si chiedono: mio

Alcuni bambini vaccinati e i loro genitori protestano contro il programma filippino di vaccinazioni per la dengue del 2016-2017.

Bullit Marquez/AP Photo

figlio era sieronegativo quando è stato vaccinato? Perché non ci hanno detto che poteva essere pericoloso? Ci telefonano e ci dicono: mio figlio ha la tosse, dobbiamo portarlo di corsa in ospedale? Mi sembra che abbia un po' di febbre, fa bene ad andare a scuola?», racconta. «E come si fa a tenere sotto controllo il raffreddore e la febbre di circa un milione di bambini per scoprire se si tratta di dengue o meno? È un incubo dal punto di vista logistico, ed è quello di cui volevamo avvertire il Ministero della salute». Praticamente tutte le morti nel gruppo di bambini vaccinati sono state attribuite a Dengvaxia, anche quelle chiaramente estranee, aggiunge, e gran parte della rabbia e della confusione si sarebbero potute evitare con consigli scientifici accurati e tempestivi da parte di autorità fidate. «È questa la parte triste, che l'OMS abbia peggiorato la confusione», conclude.

Dato che nei bambini sieronegativi vaccinati i livelli di anticorpi si abbassano fino a raggiungere un livello intermedio in cui l'ADE diventa più probabile, Halstead si preoccupa che col tempo quei bambini siano sempre più predisposti a sviluppare casi gravi di dengue se esposti a un contagio vero. Sulla base dei dati ricavati dalle sperimentazioni cliniche di Sanofi Pasteur (cioè che 5 bambini sieronegativi vaccinati su 1000 sono stati ospedalizzati per dengue e, di questi, 2 per la forma grave della malattia), ha calcolato che nelle Filippine potrebbero essere ricoverati per dengue potenziata dal vaccino più di 4000 bambini. «Non riesco a credere ai miei occhi», afferma. «Perché Sanofi non si arrovella a chiedersi: "Adesso che abbiamo reso così tante persone sensibili all'ADE, come faremo a proteggerle?"». A questa domanda Ng ha risposto che non è chiaro se i casi di dengue grave nel gruppo dei vaccinati siano stati causati da fallimento del vaccino o dall'ADE.

Tutti i pazienti, che abbiano o meno sofferto di dengue in precedenza e che siano stati vaccinati o meno, devono evitare le punture di zanzara, tenere sotto controllo i primi segnali della dengue e rivolgersi subito a un operatore sanitario se ci sono sintomi che indichino la forma severa della malattia. Alla nostra richiesta su quando sarebbe stata pubblicata la relazione finale sulle sperimentazioni cliniche, Sanofi Pasteur ha risposto che i risultati erano stati presentati con un poster a un incontro della American Society of Tropical Medicine and Hygiene a fine 2018.

I vaccini hanno salvato innumerevoli vite. Il vaiolo in natura è stato cancellato dalla faccia della Terra, la poliomielite è quasi debellata, il tetano e la rabbia non fanno più paura. Nonostante questi risultati, la paura dei vaccini è in aumento e mette milioni di bambini a rischio di contrarre malattie evitabili. Il crescente scetticismo sui vaccini è quasi interamente dovuto alla disinformazione. Anche così, però, i tanti risvolti inaspettati nella saga di Dengvaxia complicano la consueta narrativa degli scienziati coraggiosi che combattono contro l'ignoranza e i pregiudizi delle persone per cercare di mettere tutti al sicuro.

Questa storia solleva anche domande difficili su come debbano procedere case farmaceutiche e autorità di regolazione nel contesto di una conoscenza scientifica in continua evoluzione e dell'esistenza di vaccini imperfetti. È etico mettere in pericolo una minoranza per proteggere la maggioranza, come implica l'avvertimento su Dengvaxia pubblicato dall'OMS a settembre 2018? A chi spetta il compito di prendere decisioni così difficili: a organizzazioni mondiali di esperti, alle autorità sanitarie nazionali, a medici e genitori informati, o a una combinazione delle opzioni precedenti? E chi è responsabile quando le cose vanno male? ■

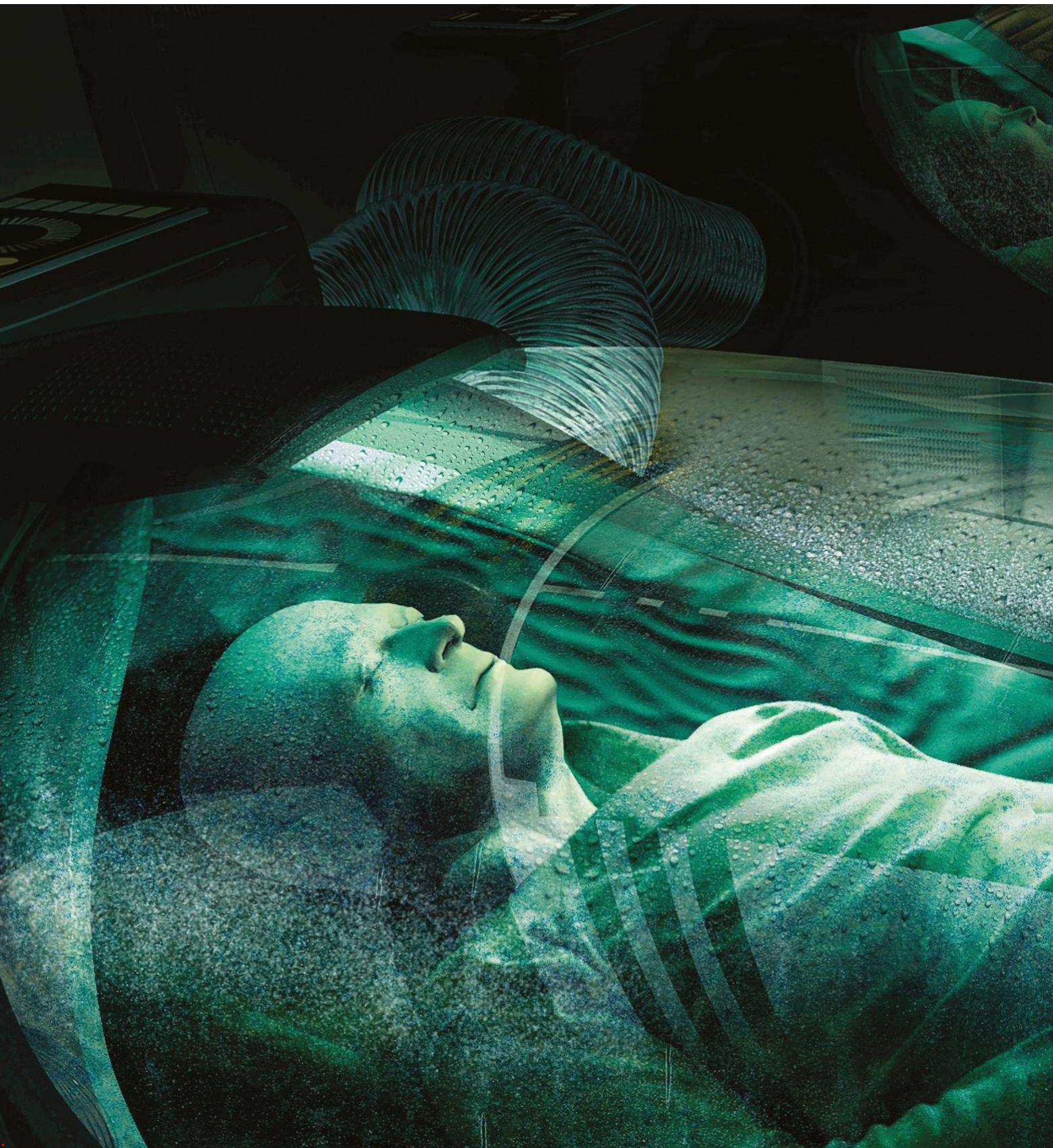
PER APPROFONDIRE

Dengue, Tropical Medicine: Science and Practice. Halstead S.B. (*a cura*), Vol. 5, Imperial College Press, 2008.

Dengue Antibody-Dependent Enhancement: Knowns and Unknowns. Halstead S.B., in «Microbiology Spectrum», Vol. 2, n. 6, articolo n. 0022-2014, dicembre 2014.

Effect of Dengue Serostatus on Dengue Vaccine Safety and Efficacy. Sridhar S. e altri, in «New England Journal of Medicine», Vol. 379, n. 4, pp. 327-340, 26 luglio 2018.

Zanzare in trappola. Strickman D., in «Le Scienze» n. 600, agosto 2018.

Inseguendo il torpore

Indurre negli esseri umani uno stato simile a quello dell'ibernazione degli animali sarebbe un traguardo epocale con vaste applicazioni

di Matteo Cerri

Idea fantascientifica. Spesso la fantascienza ha immaginato viaggi spaziali con equipaggi umani tenuti in uno stato di torpore per ridurre i rischi fisiologici e psicologici di una lunga permanenza nello spazio.

Matteo Cerri, è medico, ricercatore al Dipartimento di scienze biomediche e neuromotorie dell'Università di Bologna, membro del Topical Team Hibernation dell'Agenzia spaziale europea, associato all'Istituto nazionale di fisica nucleare e nel direttivo della Società italiana di neuroetica. Si occupa di neuroscienze del sistema nervoso autonomo e di fisiologia integrativa.

All'inizio degli anni duemila negli Stati Uniti una parte del mondo della ricerca cercava di capire come arginare la cosiddetta «epidemia di obesità». L'approccio a questa malattia è complesso ma, semplificando all'eccesso, si può dire che se l'apporto energetico supera la spesa, l'eccesso viene accumulato in forma di grasso. Su questa base, una linea di intervento per combattere l'obesità mirava ad aumentare il consumo energetico dell'organismo. Un gruppetto di ricercatori, con il quale mi ero trovato a lavorare durante il mio periodo di post-dottorato negli Stati Uniti, cercava di percorrere faticosamente questa via.

Ci eravamo concentrati su un tessuto particolare, il tessuto adiposo bruno, che è in grado di produrre calore consumando energia. Attivarlo avrebbe significato stimolare il consumo energetico, e indurre quindi una perdita di peso.

In quel periodo si sapeva poco su come il cervello controlla questo particolare tessuto. Addirittura non si era sicuri che fosse attivo e funzionale negli esseri umani (è stato dimostrato con certezza solo in seguito, nel 2009). Ma come si può attivare il tessuto adiposo bruno? Diverse aree cerebrali sembravano controllarlo; la più interessante si trova in una regione antica del cervello, il tronco dell'encefalo, e si chiama Rafe pallido. I neuroni di questa regione agivano come un interruttore. Una volta accesi, erano in grado di aumentare enormemente il consumo energetico dell'organismo. Ma nessuno aveva mai pensato di provare a spegnerli. Questa semplice idea, spegnere anziché accendere, ci ha aperto una finestra su una linea di ricerca inaspettata e per noi completamente nuova: simulare l'ibernazione.

Prima di scendere nei dettagli di come si potrebbe sfruttare il cervello per questo, è necessario però percorrere un po' a ritroso la storia di questa affascinante condizione. Che cos'è l'ibernazione? E, soprattutto, che cosa non è?

L'ibernazione è da noi più conosciuta con il termine gergale di letargo. Una condizione nota da tempo, di cui nel 1700 parlò anche Lazzaro Spallanzani nei suoi diari. Fra gli appassionati di montagna si può ascoltare il racconto ricorrente di come le marmotte scompaiono tutte più o meno nello stesso giorno d'autunno, per poi ricomparire, sempre all'unisono, in un giorno di primavera. Dove sono andate in questi mesi? Sono andate in letargo, o, più propriamente, in ibernazione. Sempre nel lessico gergale, siamo abituati a pensare a questa condizione come a un lungo sonno. Chi non ha desiderato almeno una volta di restare «in letargo» sotto le coperte nelle fredde mattine d'inverno? In realtà non c'è niente di più diverso.

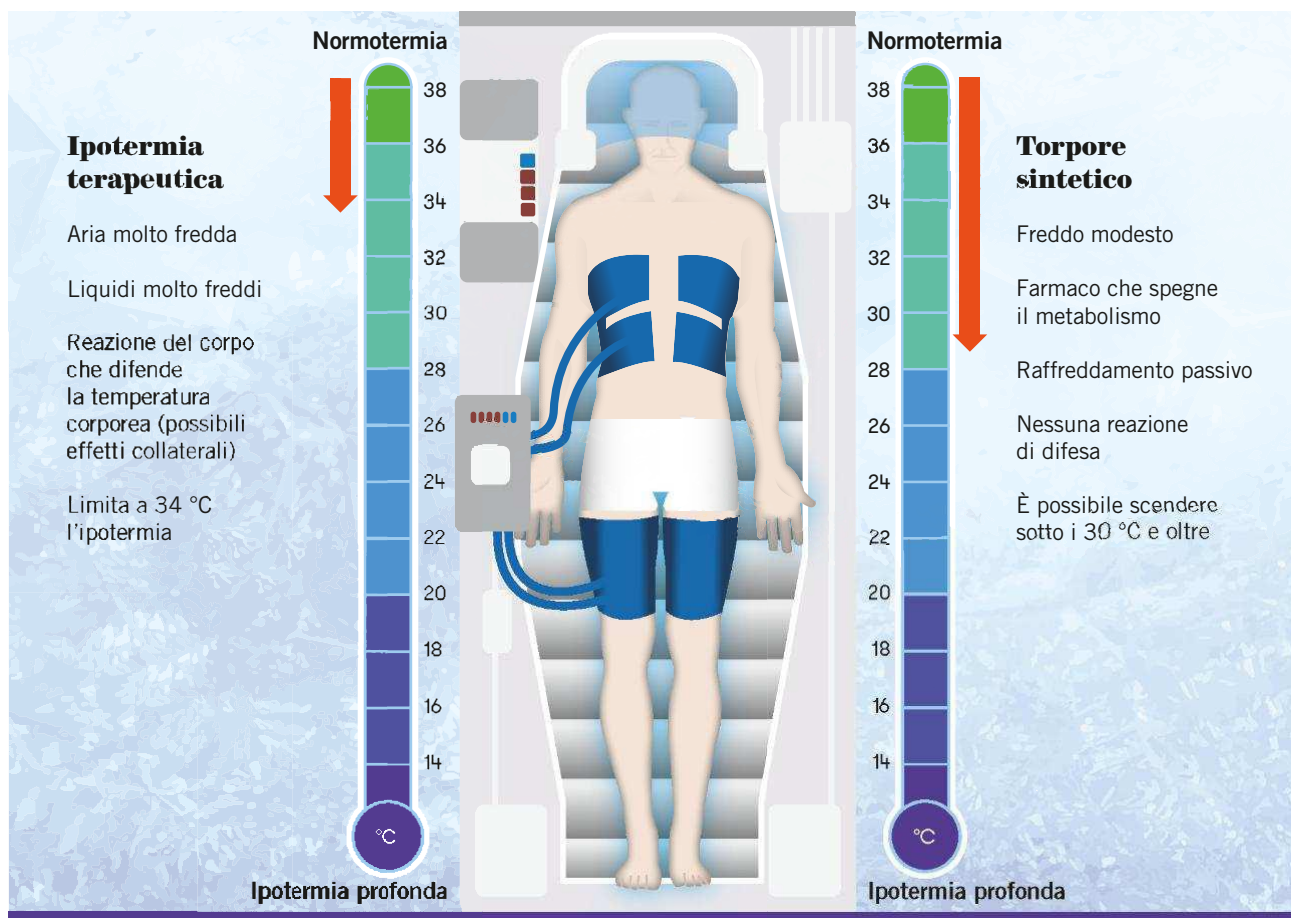
L'ibernazione è uno stato che stiamo imparando a conoscere adesso e che è molto differente dal sonno, sia esso REM o non REM, dal coma, dall'anestesia generale e da ogni altro stato cono-

Henning Dalhoff/SPL/AGF (*Pagine precedenti*)

IN BREVE

Alcuni animali sono in grado di ridurre enormemente il consumo energetico del proprio corpo in modo autonomo. Questo fenomeno è chiamato torpore e può durare per ore o giorni. Se gli episodi di torpore si susseguono uno dopo l'altro, allora può verificarsi l'ibernazione, o letargo, che dura mesi.

Gli scienziati studiano da tempo i meccanismi alla base del torpore negli animali. Raggiungere la capacità di simulare uno stato di torpore negli esseri umani sarebbe un traguardo epocale, con importanti applicazioni nella medicina e nell'esplorazione spaziale.

Negli ultimi anni sono stati fatti passi in avanti per indurre il torpore sintetico in una specie che non iberna. Ma la strada per un'eventuale applicazione all'uomo è ancora lunga.

Le differenze. Oggi per pazienti con danni al cervello, per esempio da ictus, in molti ospedali è ormai di routine l'ipotermia terapeutica; questa manovra è assai diversa dal torpore sintetico a cui puntano gli scienziati, anche perché gli effetti collaterali dell'ipotermia dovrebbero scomparire nel torpore.

Bruna Pisano

sciuto. Ma allora che cos'è? L'evento caratteristico dell'ibernazione è di tipo metabolico: gli animali che ibernano sono in grado di spegnere attivamente il loro metabolismo. In parole più semplici, sono in grado di ridurre enormemente il consumo energetico del loro corpo. Si può pensare, per analogia, a un computer che entri in *stand-by*. Questo evento chiave è peraltro anche il motivo per cui gli animali in questo stato si raffreddano, e, incidentalmente, vivono più a lungo. Non è il freddo l'evento che per primo riduce il consumo energetico, anzi, il contrario: azzerando quasi il consumo di energia, non vi è più produzione di calore e il raffreddamento è inevitabile.

Cogliendo l'occasione per un chiarimento terminologico, possiamo quindi introdurre la parola «torpore», ovvero il termine tecnico per indicare il fenomeno che abbiamo appena descritto: un'inibizione attiva del consumo energetico. Il torpore dura per un tempo limitato, che va da poche ore a diversi giorni, ma diversi episodi di torpore possono susseguirsi uno dopo l'altro. È quello che avviene nell'ibernazione vera e propria, e che può durare per molti mesi.

Galeotta fu la notte

Ma da dove vengono torpore e ibernazione? Dal punto di vista evolutivo l'ibernazione propriamente detta è una proprietà dei mammiferi. Nei libri di scienze gli animali sono divisi in omeotermi (a sangue caldo) e poichilotermi, o pecilotermi, (a sangue freddo); fra gli omeotermi rientrano i mammiferi. In realtà diverse specie di mammiferi, essendo appunto in grado di ibernare, non sono omeotermi puri. Per alcuni di essi si usa il termine «eterotermi». La ricerca cerca di capire i meccanismi che permettono ai mammiferi eterotermi di spegnere volontariamente il loro metabolismo, e quindi di raffreddarsi. Ma quanto si può raffreddare un animale in ibernazione? Il record mondiale spetta allo scoiattolo artico, che può arrivare a circa −2 gradi Celsius. Dal punto di vista evolutivo quindi dobbiamo partire dall'origine dell'omeotermia, e quindi dei mammiferi, circa 200 milioni di anni fa.

All'inizio della nostra storia, quando sulla Terra compaiono i primi mammiferi, questi animali possono sfruttare l'omeotermia per cercare di sfuggire alla predazione da parte dei sauri, vivendo di notte. Si tratta della cosiddetta teoria del «collo di bottiglia notturno», formulata nel 1942 da G.L. Walls. Di notte i nostri piccoli antenati potevano sperare di sfuggire ai dinosauri, perché molti di essi erano meno attivi di notte, dipendendo dal Sole per mantenere ottimale la loro temperatura corporea. I nostri predatori non erano però i grandi *T. rex*, ma dinosauri più piccoli, che iniziarono a cacciare i mammiferi iniziando anch'essi quindi ad adattarsi alla notte. Se con i mammiferi l'evoluzione percorreva la strada di aumentare il metabolismo, con questi piccoli sauri intraprese un altro esperimento: risparmiare calore aumentando l'isolamento termico. Ed ecco che compaiono le piume, o, per meglio dire, le protopiume.

Per decine di milioni di anni dunque è andata in scena una corsa agli armamenti termoregolatori, fra le prede, i nostri avi, che cercavano di restare caldi consumando di più, e i predatori, i sauri, che cercano di farlo disperdendo di meno. Così per lungo tempo ci siamo trovati a camminare su una lama di rasoio evolutiva, sempre in bilico sul baratro della bancarotta energetica. Una bancarotta che fortunatamente siamo riusciti a evitare grazie a quella che oggi, in termini economici, chiameremmo austerità. Per noi non era sufficiente mangiare di più in modo da soddisfare la fornace metabolica; era anche necessario risparmiare tutto il possibile in quella fase della giornata in cui non eravamo attivi. Non era sufficiente dormire. Era necessario entrare in torpore.

Oggi la maggior parte dei ricercatori del settore ritiene che molto probabilmente i primi mammiferi fossero eterotermi. Ciò significa che il tratto di eterotermia era comune ai nostri avi e che, molto probabilmente, tutti i mammiferi potrebbero conservare l'insieme di geni necessario per sopravvivere durante un episodio di torpore. Nel 2002 un interessante caso pubblicato sulla rivista «Neurology» da Pietro Cortelli, all'epoca professore di neurologia all'Università di Modena e Reggio Emilia, oggi all'Università di Bologna, e colleghi ha descritto una rara malattia in cui un paziente sembrava entrare spontaneamente in torpore, supportando l'idea che questo meccanismo possa essere riattivato.

Biosphoto/AGF

Una manna per i medici

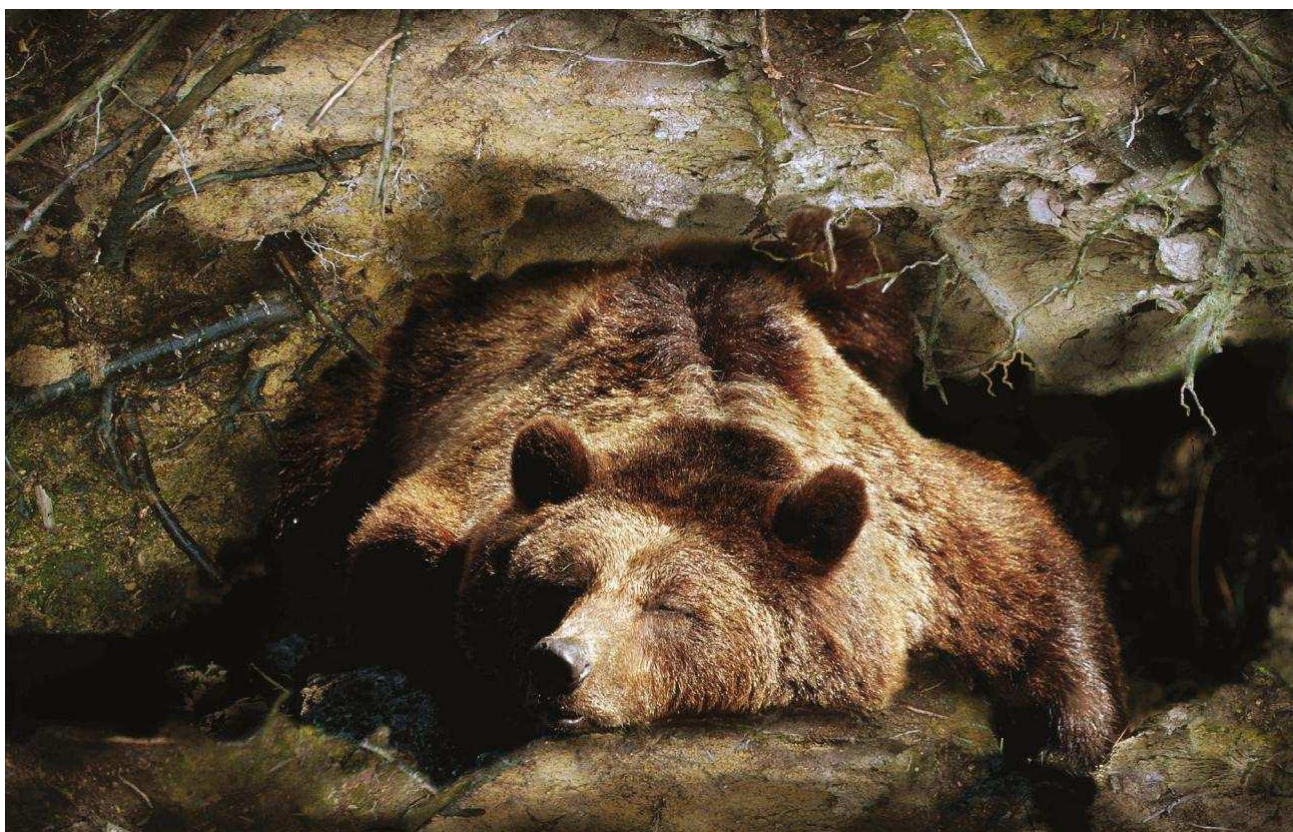
La possibilità di simulare lo stato di torpore o di ibernazione negli esseri umani avrebbe un gran numero di applicazioni cliniche. Immaginiamo che il nostro cervello sia un piccolo animale. Finché il cuore e il sistema cardiorespiratorio lo nutrono trasportando il cibo, tutto funziona come dovrebbe. Ma che succede se, per un qualunque motivo, il cibo non dovesse arrivare più? Nel nostro paragone immaginario potremmo pensare al cervello come a un animale molto vorace, che può restare per un tempo assai ristretto senza mangiare e che, qualora questo succedesse per un tempo relativamente lungo, morirebbe in fretta. Se però potessimo pensare al nostro cervello come a uno scoiattolo, ecco che allora questo cervello-scoiattolo potrebbe difendersi dalla carenza di risorse entrando in letargo. Nella vita reale però il cervello non è in grado di attivare i poteri dello scoiattolo, quindi è condannato a essere danneggiato dall'arrivo di un «inverno» causato da un arresto cardiaco o da un ictus. In questi due casi oggi si cerca di aiutare il cervello raffreddandolo. Si chiama ipotermia terapeutica, e ormai in molti ospedali è una manovra di routine.

Il paziente è raffreddato infondendolo con liquidi freddi o esponendolo a flussi d'aria fredda. L'organismo umano però, come quello di tutti i mammiferi, non vuole raffreddarsi, e, qualora percepisca questo pericolo, cerca di contrastare il raffreddamento mettendo in atto una serie di meccanismi di difesa, fra cui, al limite, l'aumento del metabolismo. Per questo motivo nell'ipotermia terapeutica non si scende sotto i 34 gradi Celsius.

È importante notare che nel caso dell'ipotermia terapeutica la sequenza degli eventi è esattamente opposta a quella osservata nel caso del torpore. Il paziente è raffreddato, e questo raffreddamento, se efficace, riduce il metabolismo. Nel torpore invece prima avviene la soppressione metabolica; il raffreddamento ne è semplicemente la conseguenza. Sarebbe quindi assai utile poter simulare una condizione di questo tipo. Oltre a essere più efficace, probabilmente eliminerebbe effetti collaterali dell'ipotermia terapeutica che non si osservano durante il torpore, per esempio la comparsa di aritmie cardiache. Riuscire a salvare più cervello possibile nelle condizioni citate sarebbe quindi di grande utilità clinica, innanzitutto per i pazienti, che avrebbero una prognosi migliore, ma anche per i sistemi sanitari, perché la riabilitazione dei danni conseguenti a ictus è una voce sempre più importante della spesa sanitaria.

Fin dall'inizio questo obiettivo ha guidato la ricerca del settore, ma negli ultimi anni sono emerse molte altre potenzialità applicative legate al torpore. Per esempio, il sistema nervoso degli animali che vanno in torpore mostra eventi sorprendenti.

I neuroni, ovvero le principali cellule del sistema nervoso centrale, formano fra loro un numero astronomico di contatti, chiamati sinapsi. Nel torpore le sinapsi, che permettono ai neuroni di comunicare fra loro, sono in gran parte riassorbite; alcune proteine, come quella chiamata «tau», che regolano la funzione dell'impalcatura che dà la forma ai neuroni, mostrano modifiche che si osservano normalmente in malattie debilitanti come il morbo di Alzheimer. Si potrebbe pensare che entrare in torpore sia come fare un tuffo nella demenza; un tuffo dal quale però si riemerge rapidamente al risveglio. Sia la riduzione della connettività sinaptica sia le modifiche della proteina tau sono normalizzate entro qualche ora dall'uscita dal torpore. È inutile evidenziare quanto la decodifica dei meccanismi molecolari che permettono a questi cervelli di rinormalizzarsi così in fretta potrebbe essere sfruttata a fini terapeutici. Con il proseguire degli studi si è scoperto che in realtà, durante il torpore, ogni organo e apparato sperimenta modifiche rilevanti relative al proprio funzionamento.

Nel sistema immunitario i linfociti escono dal circolo e ritornare ai linfonodi, come salmoni; le piastrine fanno lo stesso, ma tornano al fegato; il sistema gastrointestinale modifica la composizione del microbiota e lo stato infiammatorio delle mucosa e così via.

Sonno stagionale. Il quercino (*Eliomys quercinus, a fronte*) e l'orso bruno (*Ursus arctos*) sono due esempi di specie animali che vanno spontaneamente in ibernazione, o letargo, all'arrivo dell'inverno, spegnendo il proprio metabolismo.

Juniors Bildarchiv/AGF

Anche i tumori cambiano attività. Le cellule neoplastiche fermano la loro proliferazione e la crescita della massa tumorale. Questa osservazione si associa ad alcuni interessanti tentativi di terapia anticancro effettuati negli Stati Uniti nel periodo a cavallo fra le due guerre mondiali. In quelle sperimentazioni è stata raggiunta la temperatura più bassa a cui un essere umano è stato raffreddato e da cui si è svegliato senza conseguenze: 9 gradi Celsius. Raffreddare i tumori però non li uccide, e le cellule neoplastiche tornano a proliferare al risveglio. Si potrebbe tuttavia pensare di sfruttare la temporanea sospensione della proliferazione per mettere in atto protocolli terapeutici, sia chemio sia radio, con maggior efficacia. Attualmente quest'ultima strategia è valutata solo sul piano teorico, senza test di laboratorio, ma l'interesse per la materia rende probabile uno sviluppo del genere nei prossimi anni.

In generale, durante il torpore l'intero organismo entra in una nuova modalità funzionale. Proprio questo esito può essere sfruttato per interventi terapeutici che normalmente non sarebbero permessi.

Il torpore del ratto

Ma è davvero possibile indurre il torpore in animali che non ibernano in natura (fra cui gli esseri umani)? Fino a una decina di anni fa, la prospettiva anche solo di poter simulare il torpore nella nostra specie era facilmente bollabile come fantascienza. L'ultimo decennio però è stato ricco di scoperte. Una menzione d'onore spetta all'esperimento pubblicato su «Science» nel 2005 da Mark Roth dell'Università di Washington a Seattle e colleghi, in cui si è mostrato che l'acido solfidrico (H_2S) in bassissime dosi poteva mandare in «animazione sospesa» topi di laboratorio. «Animazione sospesa» è stato uno dei termini con cui si è iniziato a definire questo stato di torpore artificiale. Ne sono stati proposti altri, come *torpor-like state* (stato simile al torpore), pseudotorpore, torpore artificiale, fino al più recente, e, non posso negare, da me proposto, torpore sintetico: locuzione che, con mio piacere, è stata adottata anche da ricercatori alla NASA. In questo articolo quindi, userò l'espressione «torpore sintetico» per riferirmi a tutte quelle condizioni in cui uno stato artificialmente indotto mostri almeno alcune caratteristiche del torpore in una specie che in natura non è in grado di entrarvi.

Il lavoro di Roth aveva generato aspettative altissime: l'acido solfidrico è un gas, quindi è facile da somministrare e potente negli effetti. Purtroppo però l'H_2S non si è dimostrato efficace in test su altri animali. Il motivo riguarda proprio il modello usato: il topo di laboratorio. Nelle giuste condizioni, questo animale è in grado di entrare in torpore spontaneamente. Dunque è probabile che l'acido solfidrico abbia stimolato l'animale a entrarvi. Ma animali non ibernanti su cui in seguito è stato testato H_2S non sono stati in grado di rispondere allo stesso modo. Il tentativo di Roth, tuttavia, ha stimolato i ricercatori a usare modelli animali che non mostrassero torpore. La scelta è caduta sul ratto, un roditore che pesa circa 300 grammi, contro i 20-30 grammi del topo.

Nel 2013 due esperimenti hanno mostrato che in effetti si poteva indurre il torpore sintetico anche nel ratto. Ho condotto il primo dei due esperimenti, il cui approccio era inusuale per il settore. Il torpore è causato da una riduzione del metabolismo. Per questo motivo la maggioranza della comunità scientifica pensa-

va che sarebbe stato necessario ridurre in qualche modo l'attività di quell'organello che a livello cellulare è il metabolismo incarnato: il mitocondrio. Questo organello è la struttura che usa l'ossigeno per produrre energia. Religiosamente, e riduttivamente, potremmo dire che è il luogo dove il metabolismo si compie. L'acido solfidrico era stato usato proprio per questo motivo: è un inibitore dell'attività dei mitocondri. Di certo l'attività mitocondriale ha un ruolo nel torpore, ma è difficile pensare che una sostanza che blocchi indiscriminatamente la produzione di energia a livello cellulare possa essere ben tollerata dall'organismo. Sarebbe un po' come se i marinai di una nave venissero licenziati sui due piedi mentre la nave è in navigazione. Niente meccanici a tenere a posto i motori, inservienti a pulire i corridoi, cuochi a preparare da mangiare. Senza lavoratori attivi, la nave finirebbe per subire qualche tipo di danno.

Quello che succede nel torpore è in effetti diverso: i marinai eseguono l'ordine del comandante di ridurre il consumo di energia. Accompagnano quindi la nave in porto, impacchettano tutto quello che devono e lo mettono nella stiva ben ordinato e pronto a essere ripreso quando servirà, mantenendo attivi solo quei servizi indispensabili affinché il comandante possa comunque sapere qual è lo stato della nave, magari lasciando accesa solo la luce del suo studio.

La nostra idea è stata qualcosa di simile: «ingannare il cervello» e fargli credere che non fosse più necessario produrre energia. Abbiamo ottenuto questo risultato, pubblicato nel 2013 sul «Journal of Neuroscience», ingannando farmacologicamente quei neuroni che, come detto, in passato abbiamo cercato di attivare per combattere l'obesità. Qualche mese dopo, sulla stessa rivista, Domenico Tupone, della Oregon Health & Science University di Portland, ha pubblicato un risultato dello stesso tipo, mostrando che anche l'attivazione dei recettori di una molecola endogena nota come adenosina era in grado di ingannare il cervello in modo simile. Per il momento, questi sono gli unici due esperimenti che hanno mostrato una procedura sicura ed efficace per indurre il torpore sintetico in una specie animale che non iberna. Ma la strada per un'eventuale applicazione umana è ancora lunga.

Utile per lo spazio

Per me è stata una sorpresa ricevere una telefonata da parte di un collega con molto più prestigio scientifico del mio, nella quale mi diceva che l'Agenzia spaziale europea stava pensando di attivare un gruppo di ricerca dedicato all'ibernazione e voleva sapere se potessi essere interessato a farne parte. Come rifiutare una simile offerta? Ibernazione e fantascienza vanno spesso insieme e la trama di tanti film non potrebbe stare in piedi senza il ricorso all'ibernazione. Pensiamo a *Interstellar*, o ad *Alien*, ma anche a *Il dormiglione* o *Vanilla Sky*.

Prima che il lettore si lasci andare a facili entusiasmi, è mio dovere riportarlo al più rigoroso dominio della realtà scientifica. L'esplorazione del sistema solare è solo agli inizi, e prima che una tecnologia per indurre il torpore sintetico sia disponibile per applicazioni spaziali passerà ancora un po' di tempo.

Ma quali sarebbero i vantaggi di viaggiare nello spazio in questo stato? Il primo riguarda la quantità di cibo. Una persona in torpore sintetico non avrebbe bisogno di mangiare o bere e non produrrebbe neanche scarti biologici. Questo ridurrebbe considerevolmente la quantità di cibo che sarebbe necessario portare a bordo, con un consistente risparmio economico. Un secondo vantaggio considerevole riguarda il benessere psicologico dei mem-

L'ESPERIMENTO

Tra ibernazione e microgravità

In condizioni di microgravità, i muscoli tendono a diventare atrofici e a perdere forza. Alcuni animali però possono ibernare per molti mesi, restando quindi inattivi, senza perdere tono e forza muscolare. Al momento non sappiamo chi possa uscire vincitore da un confronto ibernazione-microgravità e se, quindi, l'ibernazione possa proteggere i muscoli dall'insorgenza dell'atrofia. Ma l'esperimento che potrebbe risolvere la questione è concettualmente semplice.
Si tratterebbe di ospitare a bordo della Stazione spaziale internazionale (ISS) alcuni scoiattoli in ibernazione per poi riportarli sulla Terra. Lo stato dei loro muscoli al rientro darebbe informazioni chiave alla ricerca in quest'area. Di recente alcuni membri del Topical Team Hibernation dell'ESA e dell'Advanced Concept Team che lo coordina hanno suggerito esplicitamente questa proposta in un articolo pubblicato sull'*Handbook of Life Support Systems for Spacecraft and Extraterrestrial Habitats* (Springer).

Ibernazione sulla Stazione spaziale internazionale: una proposta

1. Le basi scientifiche
Nonostante un lungo periodo di inattività, gli ibernanti sono resistenti a:
* debolezza muscolare
* demineralizzazione ossea
* danni da radiazioni

2. Il modello animale
È stato scelto lo scoiattolo di terra dalle 13 linee, poiché è un ibernante obbligato stagionale

3. Lancio

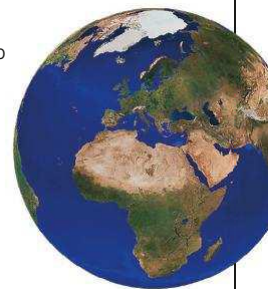
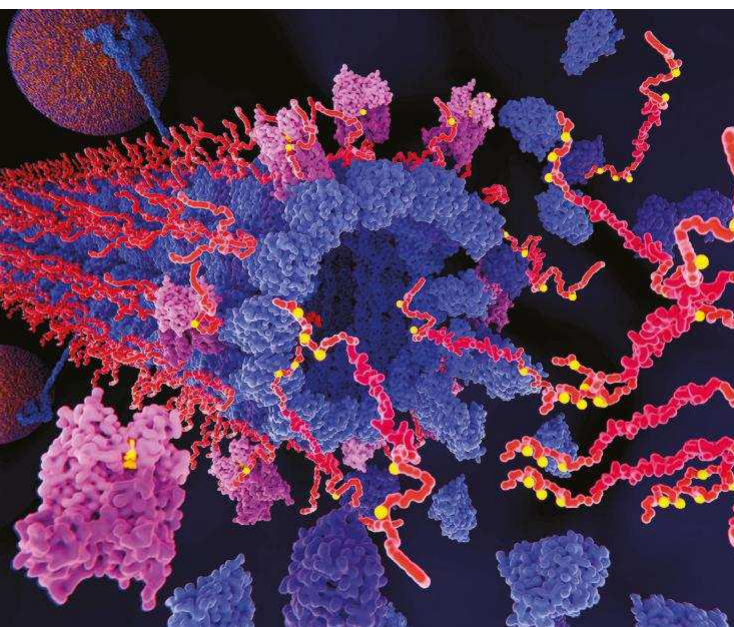
4. Esperimenti sulla ISS
Un periodo di ibernazione a bordo della ISS per valutare il grado di protezione che l'ibernazione conferisce nei confronti di:
* ipotonia muscolare
* demineralizzazione ossea
* danni da radiazioni

5. Valutazione biologica
Rientro sulla Terra per valutare lo stato degli animali

6. Obiettivi
Capire i meccanismi di protezione dell'organismo attivati dall'ibernazione per sfruttarli e sviluppare strategie per rendere la permanenza nello spazio per lunghi periodi più sicura.

sdbower/iStock (*scoiattolo*); Science Photo Library (*ISS e Terra*)

Juan Gaertner/SPL/AGF

Cambio di forma. Nel torpore, le proteine tau (*in arancione*) mostrano modifiche reversibili osservate in malattie debilitanti come l'Alzheimer.

bri dell'equipaggio. Alla riduzione della privacy individuale si aggiunge lo stress del vivere in condizioni di microgravità e anche la percezione di essere lontani dalla Terra. In queste condizioni il rischio è che si sviluppi quella che una volta veniva chiamata *cabin fever*, ovvero che qualche membro dell'equipaggio sviluppi un attacco psicotico nel quale non riconosce più gli altri compagni di viaggio come amici ma anzi li veda come figure ostili verso cui manifestare atteggiamenti anche violenti. Sembra ancora una volta di leggere una storia di fantascienza, ma nei fatti se l'equipaggio potesse essere in uno stato di coscienza ridotto, come dovrebbe avvenire durante il torpore sintetico, questo rischio potrebbe essere scongiurato.

Una terza conseguenza positiva del torpore sintetico spaziale riguarda la salute dei muscoli e delle ossa. Le immagini di astronauti portati in braccio al loro rientro sulla Terra sono impresse nella nostra memoria. Quel trasporto è necessario perché nello spazio, senza la stimolazione della gravità terrestre, i muscoli perdono rapidamente tono e forza. Anche le ossa si indeboliscono, e l'osteoporosi è una conseguenza frequente della permanenza nello spazio. A differenza degli esseri umani, quindi, nei quali l'inattività produce debolezza muscolare e demineralizzazione ossea, gli animali che ibernano, pur restando inattivi per mesi, non mostrano questi sintomi. Ancora non sappiamo se le caratteristiche di protezione muscolare e ossea che si osservano in questi animali siano anche efficaci nel combattere l'atrofia muscolare osservata negli astronauti, e per questo sarebbe necessaria una verifica sperimentale (*si veda il box nella pagina a fronte*).

Una tecnologia da studiare

Oltre a quanto già descritto, c'è un altro, importantissimo vantaggio biologico che il torpore sintetico potrebbe conferire ai futuri esploratori del sistema solare: la radioresistenza. Nello spazio aperto ci si troverebbe esposti a una quantità considerevole di radiazioni, costituite principalmente da protoni che viaggiano a velocità assai elevate. Queste radiazioni sono deviate dal campo magnetico terrestre, dunque sulla Terra siamo protetti; nello spazio aperto però siamo privi di questa protezione. Al momento l'unica strategia a cui possiamo pensare è il potenziamento delle schermature delle sonde spaziali; per fortuna, però, anche il torpore potrebbe aiutarci.

Nei decenni successivi alla seconda guerra mondiale c'era stata molta attenzione ai possibili danni causati dalle radiazioni. Lo sviluppo delle armi nucleari aveva spinto a cercare mezzi di difesa da un eventuale *fallout* radioattivo, ma anche il progressivo incremento dell'uso delle radiazioni nella pratica clinica aveva sollecitato lo studio dei rischi a esse legati. L'ibernazione sembrava potere conferire un certo grado di radioprotezione, come conseguenza della ridotta attività metabolica dell'animale. In quegli anni, dunque, erano stati condotti esperimenti per testare come gli animali in ibernazione reagissero alle radiazioni. Di recente, insieme a colleghi dell'Istituto nazionale di fisica nucleare, ho pubblicato su «Life Science in Space Research» una revisione di quei dati, dimostrando che i risultati di quegli esperimenti sono stati sorprendenti. L'ibernazione aveva conferito una resistenza elevata ai danni biologici causati dalle radiazioni, anche in caso di radiazioni estremamente elevate. Per molto tempo si è pensato che il meccanismo alla base di questa protezione fosse la stasi cellulare indotta dall'ibernazione. Quando le cellule non si duplicano, il DNA è più protetto. Era stato suggerito anche che nell'ibernazione si sviluppasse un'ipossia relativa dei tessuti, che avrebbe contribuito a ridurre i danni da radiazioni.

Recentemente però si è visto che l'effetto protettivo si ottiene anche se il torpore sintetico è indotto dopo l'irraggiamento. L'esperimento in questione, pubblicato nel 2017 su «Scientific Reports» da Prem Kumar Indraganti, dell'Institute of Nuclear Medicine and Allied Sciences di Nuova Delhi, in India, e colleghi ha aperto nuovi scenari. Da un lato potrebbe essere una terapia efficace per chi fosse esposto a dosi letali di radiazioni, per esempio i tecnici di una centrale nucleare in caso di avaria; dall'altro lato però richiede che ci siano altri meccanismi che conferiscano questa protezione, oltre all'ipossia e alla stasi replicativa. Per esempio, i meccanismi di riparazione del DNA funzionano meglio a bassa temperatura? È un'ipotesi attualmente allo studio.

Il torpore sintetico, quindi, potrebbe rivelarsi una tecnologia con ampie ricadute nel mondo della medicina e in quello dell'esplorazione spaziale. Dal punto di vista fisiologico si tratta di un nuovo modo di esistere dell'organismo, e va esplorato come se fosse un nuovo pianeta. ■

PER APPROFONDIRE

The Inhibition of Neurons in the Central Nervous Pathways for Thermoregulatory Cold Defense Induces a Suspended Animation State In the Rat. Cerri M., Mastrotto M., Tupone D., Martelli D., Luppi M. e altri, in «Journal of Neuroscience», Vol. 33, n.7, pp. 2984-2993, 13 febbraio 2013.

Central Activation of the A1 Adenosine Receptor(A1AR) Induces a Hypothermic, Torpor-like State in the Rat. Tupone D. e altri, in «Journal of Neuroscience», Vol. 33, n. 36, pp. 14512-14525, 4 settembre 2013.

Hibernation for Space Travel: Impact on Radioprotection. Cerri M., Tinganelli W., Negrini M., Helm A., Durante M. e altri, in «Life Sciences in Space Research», Vol. 11, pp. 1-9, 2016.

The Central Control of Energy Expenditure: Exploiting Torpor for Medical Applications. Cerri M., in «Annual Review of Physiology», Vol. 79, pp. 167-186, 10 febbraio 2017.

Al buio, la rana temporaria, riesce a distinguere il verde dal blu.

ZOOLOGIA

Visioni notturne

Molti animali, che una volta si credeva vedessero poco al buio, usano trucchi del sistema nervoso per avere un'ottima visione nell'oscurità

di Amber Dance

Amber Dance, scrittrice scientifica, vive nell'area di Los Angeles.

Gli ultimi raggi solari filtrano tra le foglie mentre cala la notte sulla foresta pluviale, impenetrabile e afosa. Il crepuscolo che scende sull'isola di Barro Colorado, a Panama, oscura gli alberi di *kapok* svettanti e spinosi, le palme e i cespugli, finché l'occhio umano non riesce a vedere molto più dei piccoli riquadri di cielo stellato attraverso la chioma soprastante. I grilli cominciano il loro concerto, mentre le scimmie urlatrici di notte tacciono.

Al crepuscolo un'ape del sudore notturna, con gli occhi sporgenti, la testa verde metallizzato e l'addome marrone chiaro, emerge dal nido, ricavato in uno stecco svuotato lungo una trentina di centimetri. Ha fame di nettare e polline. Ma prima di spiccare il volo si gira per guardare di nuovo lo stecco, su cui gli scienziati hanno disposto una carta a strisce bianche e nere. Anche sui nidi vicini si trovano carte, che però sono di un grigio uniforme.

Dopo che l'ape se n'è andata, lo zoologo Eric Warrant e i suoi colleghi dell'Università di Lund, in Svezia, cambiano qualcosa: spostano la carta a strisce su un altro nido. Quando torna, l'ape sfreccia subito verso il nido con le strisce, dando per scontato che sia il suo: dimostra così che le api del sudore identificano e usano questi segnali visivi. Spiega Warrant: «Perfino con una luce di intensità minima lo vedono senza problemi». Lo zoologo fa notare che il buio è talmente fitto che, se le persone impegnate a osservare gli insetti non portassero gli occhiali per visione notturna, andrebbero «letteralmente a schiantarsi contro gli alberi».

La straordinaria visione notturna di queste api (*Megalopta genalis*) deriva solo in parte da adattamenti degli occhi, come lenti più grandi. Queste in effetti migliorano la sensibilità alla luce, ma le api del sudore riescono a ritrovare il nido anche quando la luminosità è così scarsa che non basterebbero nemmeno occhi così grandi. Warrant ha dedotto che il loro orientamento dopo il tramonto dipende non solo dagli occhi, ma anche da come il cervello elabora la poca luce disponibile.

Per decenni gli scienziati hanno dato per scontato che di notte la maggior parte degli animali dovesse vedere lo stesso paesaggio buio e senza colori visto dagli esseri umani. Pensavano che gli animali notturni facessero affidamento su altri sensi, per esempio olfatto e udito. Oggi una nuova ondata di ricerche sta confutando questa convinzione. «Abbiamo sempre pensato di sapere come vedono gli animali al buio, ma pochi avevano guardato davvero», spiega Warrant. Una volta che hanno cominciato a osservare questo mondo oscuro, i ricercatori hanno scoperto che un'ampia varietà di specie vede il paesaggio notturno in modo nitido.

Falene, rane e gechi, per esempio, riescono a distinguere i colori di notte, quando gli stessi ricercatori non vedono altro che sfumature di grigio. Per loro la maggiore sensibilità alle variazioni cromatiche è un vantaggio perché, sia alla luce sia al buio, il colore è un modo di distinguere gli oggetti molto più affidabile rispetto a indicatori di altro tipo, per esempio l'intensità. Può aiutarli a trovare il cibo, il nido o il partner nell'oscurità. «È davvero sorprendente quanti animali siano attivi al buio e riescano a svolgere compiti che invece a noi sono preclusi», commenta Almut Kelber, esperta di biologia sensoriale all'Università di Lund.

I segreti dell'orientamento notturno si trovano tra occhio e cervello. Nel sistema di visione di questi animali, i neuroni accumulano piccole quantità di luce per creare un'immagine più chiara e sfoltirla con cura da altri segnali di disturbo che la confonderebbero. Le cellule eseguono queste operazioni di accumulo raccogliendo segnali da punti vicini nel campo visivo. Inoltre accumulano i segnali provenienti da un singolo punto per un periodo di tempo lungo, sostanzialmente rallentando la percezione visiva per renderla molto più luminosa.

Colori vividi

Gli occhi degli esseri umani, come quelli della maggior parte di vertebrati e invertebrati, hanno cellule che agiscono da fotorecettori, rilevando la luce in arrivo dall'esterno. Queste cellule si chiamano coni e bastoncelli. Di giorno usiamo soprattutto i coni, che inviano segnali al cervello quando sono colpiti da fotoni di luce rossa, verde o blu. Danno una visione a colori eccellente, ma al buio non sono molto reattivi. Quando la luce è scarsa ci affidiamo ai bastoncelli, più sensibili perché lavorano in gruppi, mettendo

IN BREVE

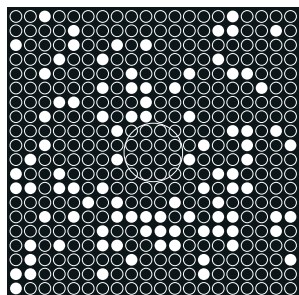
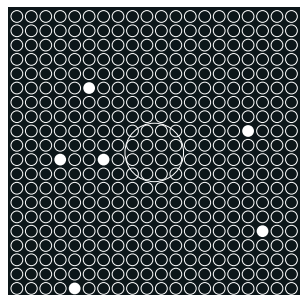
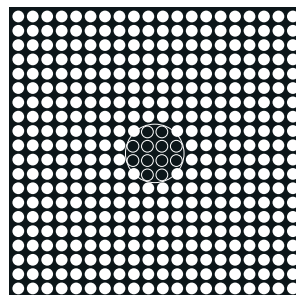
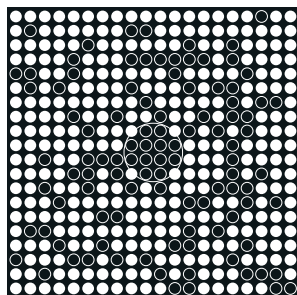
Vari animali al buio hanno una buona visione. In passato gli scienziati pensavano che avessero bisogno degli altri sensi per trovare cibo o partner.

Queste capacità includono la visione dei colori. Animali come falene, rane e gechi rilevano i colori al buio per orientarsi.

Gli animali riescono in questa impresa usando i neuroni del sistema visivo per sfruttare al massimo i segnali scarsi che ricevono dagli occhi.

Håkan Lijenberg/Alamy (*pagine precedenti*)

Problemi notturni

Quando fa buio, le cellule dell'occhio che rilevano la luce hanno scarse possibilità di catturare i pochi fotoni (le unità di luce) che potrebbero rivelare un oggetto. Questo grafico rappresenta 400 fotorecettori che cercano di distinguere un cerchio. Con l'arrivo di solo sei fotoni (*a sinistra*), il cerchio resta identico allo spazio scuro circostante. Di pari passo con il numero dei fotoni, aumenta anche il contrasto fra il cerchio e l'ambiente. Ma l'oggetto si vede chiaramente solo quando il livello è aumentato di 1000 volte (*a destra*).

Da *The Remarkable Visual Capacities of Nocturnal Insects: Vision at The Limits With Small Eyes And Tiny Brains*, di Warrant E.J., in «Philosophical Transactions Of The Royal Society B», Vol. 372, 5 aprile 2017

in comune le informazioni che ricevono dalla poca luce in arrivo. Però tendono a distinguere solo sfumature di grigio.

In uno studio del 2002 Warrant, Kelber e Anna Balkenius, un'altra loro collega a Lund, sono stati i primi a rilevare la visione notturna a colori in un animale. In laboratorio i ricercatori hanno messo in gabbia farfalle notturne dette sfingi, e le hanno addestrate ad associare un fiore artificiale, o blu o giallo, con una ricompensa di acqua zuccherata. Gli zoologi hanno cominciato i test con una luminosità crepuscolare, quindi l'hanno abbassata fino al livello di una tenue luce delle stelle. Per quanto l'ambiente diventasse buio, le sfingi riuscivano ancora a distinguere il giallo dal blu. In seguito a quello studio il gruppo di Kelber ha rilevato la visione notturna a colori nelle api legnaiole e nei gechi. Spera di fare test sulla visione a colori nei pipistrelli della frutta e nei gufi, la cui abilità nella caccia notturna di solito è attribuita a un udito acuto o a occhi grandi.

Anche le rane riescono a vedere i colori al buio: distinguono il blu dal verde. Kristian Donner, esperto di fisiologia animale all'Università di Helsinki, in Finlandia, ha testato con i suoi colleghi la fototassi nelle rane rosse: è un comportamento che in genere le porta a saltare verso la luce. Donner si è chiesto se abbiano una preferenza per un certo colore. Decenni fa, test sui bastoncelli delle rane avevano dimostrato che alcune reagivano in particolare alla luce blu, altre a quella verde. Per scoprire come le differenze tra le cellule influissero sul comportamento delle rane, il gruppo di Donner ha messo 17 anfibi, uno alla volta, in un secchio con due finestre su due lati opposti. Poi gli scienziati hanno acceso una luce blu da una parte e una verde dall'altra, e hanno misurato frequenza e direzione dei salti delle rane con vari livelli di luce.

Quando il secchio era buio, i salti erano casuali. Ma appena i ricercatori hanno lasciato entrare la minima quantità possibile di luce le rane hanno manifestato una netta preferenza per il verde: «In condizioni limite per la visibilità, riescono ancora a distinguere blu e verde», spiega Donner. Per fare un paragone con gli esseri umani, i suoi studenti con la testa nel secchio non riuscivano a vedere la benché minima luce, tanto meno a distinguere il verde dal blu.

Non si sa con certezza perché gli anfibi saltassero verso il verde. Forse, ipotizza Donner, le rane ricevono indicazioni dalle stelle. La loro luce include lunghezze d'onda relativamente elevate, e quelle della luce verde sono maggiori rispetto a quelle della luce blu. Il verde che arriva nel secchio potrebbe indicare spazi aperti illuminati dalle stelle, quindi una via di fuga dal contenitore.

Percorsi illuminati dalle stelle

Se effettivamente le rane seguissero le stelle, non sarebbero gli unici animali a farlo. Gli scarabei stercorari procedono in un rettilineo perfetto nelle notti senza Luna, quando l'unica luce arriva dalle stelle. Il movimento è una buona strategia per uno scarabeo con una pallina di escrementi freschi, come spiega James Foster, esperto di biologia sensoriale all'Università di Lund. Vuole abbandonare i suoi simili assembrati intorno allo sterco e trovare un posto tranquillo per sotterrare il suo tesoro. Andare dritto, invece che a zigzag o girare in tondo, permetterà all'insetto di allontanarsi dalla folla il più velocemente possibile.

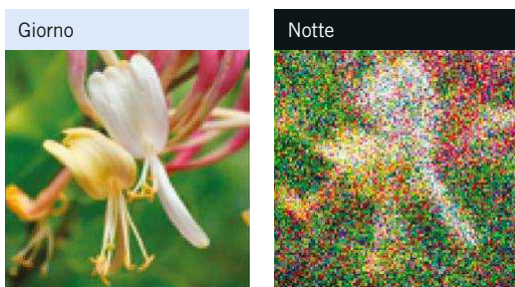
Come ci riescono gli scarabei? Marie Dacke, consulente di Foster a Lund, insieme con Warrant e altri ricercatori aveva già scoperto che gli insetti per orientarsi usano ciò che vedono sopra di sé. Gli scienziati hanno disposto sopra gli animali delle visiere di cartone, in modo che non potessero vedere il cielo. Quindi li hanno liberati in un'arena circolare e hanno osservato come ciascuno si dirigeva verso il bordo. Quando si trovavano al coperto, gli scarabei percorrevano tragitti molto più tortuosi, indizio del fatto che in cielo avessero un punto di riferimento importante.

I ricercatori sospettavano che gli scarabei potessero orientarsi in base al disegno delle stelle, come marinai che navigassero aiutandosi con le costellazioni. Per testare l'idea, Dacke e colleghi hanno portato gli scarabei con le loro palline in un planetario, dove le condizioni della luce stellare si potevano modificare facilmente. Con la simulazione di un cielo stellato, o solo della striscia luminosa della Via Lattea, gli scarabei sfrecciavano dritti verso il bordo del cerchio in meno di un minuto. Se la galassia era assente, impiegavano più tempo: per la prima volta è stato dimostrato che un animale si orienta in base a questa striscia di stelle. Dopo essere stato pubblicato su «Current Biology» nel 2013, il lavoro ha vinto uno scherzoso premio Ig Nobel per la biologia e l'astronomia.

Di recente Foster ha indagato su come gli scarabei stercorari potrebbero usare la Via Lattea per andare in una data direzione.

LA STRATEGIA DELL'ACCUMULO

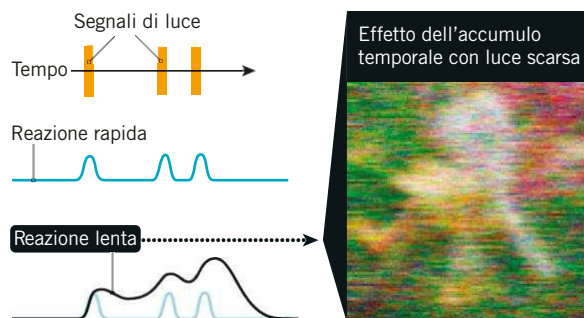
Migliorare l'immagine con luce scarsa

Durante il giorno c'è moltissima luce per una visione acuta. Di notte, invece, i pochi fotoni disponibili riescono di rado a stimolare i fotorecettori e lo fanno debolmente. Il risultato è un'immagine sgranata e scura. Le farfalle notturne chiamate sfingi risolvono il problema accumulando questi fotoni scarsi sia nello spazio che nel tempo.

Accumulo spaziale

Al buio i segnali scarsi delle immagini si dirigono dai fotorecettori alle aree cerebrali che elaborano le informazioni visive. Ma in alcuni insetti, in una regione intermedia, le cellule unipolari della lamina condividono i segnali provenienti da punti dell'occhio adiacenti. Così si crea un'unità visiva più luminosa, ma si perde definizione, dato che si abbinano segnali da posizioni diverse.

Accumulo temporale

I fotorecettori possono rallentare la velocità con cui di notte trasmettono i segnali al cervello. Ad alte velocità, ciascun segnale da solo è debole per stimolare una reazione degna di nota nelle aree cerebrali deputate alla visione. Ma rallentando le proprie reazioni le cellule permettono ai segnali di accumularsi, generando uno stimolo più forte. Inoltre così si migliora la luminosità, ma anche in questo caso perdendo in acutezza.

Da *Neural Summation in The Hawkmoth Visual System Extends The Limits of Vision in Dim Light*, di Stöckl A.I. e altri, in «Current Biology», Vol. 26, n. 6, 21 marzo 2016 (*immagini di fiori*)

Osservata dal nostro pianeta, la spessa striscia di stelle della galassia forma una linea piuttosto simmetrica. Dalla prospettiva degli scarabei, che si stiano muovendo in avanti oppure indietro, la linea non dovrebbe cambiare aspetto. Tuttavia, gli insetti non restano disorientati.

Foster sospettava che gli scarabei rilevassero le piccole differenze di ntensità luminosa tra due estremità della Via Lattea. Quando ha analizzato foto della galassia scattate dall'habitat degli stercorari in Sudafrica, ha scoperto che effettivamente l'intensità della luce, tra l'estremità settentrionale e quella meridionale della Via Lattea, aveva una differenza almeno del 13 per cento, e a volte molto più grande, a seconda di come si elaboravano le immagini.

Per verificare questo effetto nella pratica sugli scarabei, Foster ha realizzato un modello semplificato della Via Lattea con LED disposti in fila indiana lungo un arco al di sopra di un'arena. Poteva variare l'intensità della luce su ciascun lato. Gli scarabei andavano dritti se tra un'estremità e l'altra della fila c'era una differenza di luminosità del 13 per cento, ma tentennavano se era inferiore. Questo risultato ha indicato che gli scarabei riescano a distinguere le due estremità della Via Lattea.

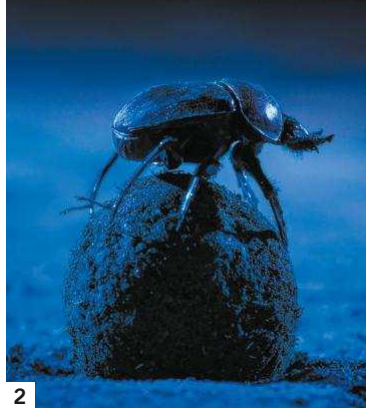
Potenziamento dei segnali

Oggi sappiamo che, oltre a scarabei e api, parecchi altri animali vedono bene in ambienti bui: blatte, pesci lanterna, seppie, rane e primati notturni come gli aoti. E i neuroscienziati si stanno chiedendo come facciano. Occhi più grandi, per esempio, raccolgono più luce, ma non abbastanza da giustificare la visione notturna molto sensibile che gli scienziati hanno rilevato. Deve avvenire un'altra elaborazione visiva dopo che i bastoncelli hanno assorbito la luce in arrivo. In particolare, gli animali devono essere in grado di superare o eliminare il «rumore» visivo prodotto dall'attività dei fotorecettori, che non rivela niente di utile sul mondo visibile.

Il rumore nel sistema visivo proviene da svariate fonti. Una, il cosiddetto rumore *shot* dei fotoni, si verifica quando solo pochi fotoni raggiungono i fotorecettori. Dato che questi pacchetti di luce tendono ad arrivare sporadicamente, generano un'immagine variabile e poco affidabile. È come se di notte accendeste tre o quattro torce per illuminare la volta della Cappella Sistina: non potreste certo apprezzare il capolavoro di Michelangelo nel suo insieme.

Una seconda fonte è costituita dalle interazioni molecolari nei fotorecettori. Un fotorecettore percepisce la luce quando un fotone in arrivo colpisce una molecola detta rodopsina. Ma ogni tanto, al massimo una volta al minuto, una molecola di rodopsina è attivata per caso, o si verifica un malfunzionamento in un'altra parte del percorso. Questo rumore si può percepire perfino nel buio più totale, a occhi chiusi. Una terza fonte, il rumore del trasduttore, deriva dalle variazioni di tempo e intensità nella reazione del sistema visivo a un singolo fotone.

Di giorno il rumore non è un problema, perché l'enorme quantità di fotoni che raggiungono gli occhi rende insignificanti queste leggere variazioni. Al buio, invece, gli animali hanno bisogno di una strategia per potenziare il segnale fino a un livello che superi ancora in modo netto il rumore. E ci riescono accumulando i segnali che ricevono da singoli fotorecettori nello spazio e nel tempo.

L'accumulo spaziale funziona così: immaginate di essere a un concerto in cui 1000 persone fanno ondeggiare il cellulare illuminato. Non riuscite a vedere bene la luce di ciascun telefono. Se ogni gruppo di 50 spettatori raggruppasse la luce dei rispettivi te-

Con luce scarsa, le api del sudore (*1*) rilevano schemi dettagliati, gli stercorari (*2*) si orientano con la luce delle stelle, le sfingi (*3*) mischiano segnali visivi per rendere più chiare le immagini e i macachi nemestrini (*4*) eliminano le interferenze da quello che vedono.

Alamy (*1*); Chris Collingridge (*2*); Malcolm Schuyl Alamy (*3*); Anup Shah Getty Images (*macaco*)

lefoni in un faro più luminoso, vedreste bene quei 20 fari. La retina, lo strato di tessuto che contiene bastoncelli e coni, fa altrettanto, raggruppando gli input di molti bastoncelli in un solo segnale più intenso, inviato al cervello. Al concerto perdete l'immagine di ogni persona che muove il telefono, lo stesso accade con l'accumulo spaziale: l'immagine risultante è più luminosa, ma più sgranata.

Anche l'accumulo temporale aumenta la luminosità. I bastoncelli rallentano la propria attività, raggruppando gli input dai fotoni che arrivano, per esempio, per un periodo di 100 millisecondi. Ancora una volta si raggiunge un compromesso: questo tipo di accumulo facilita il rilevamento degli oggetti, ma li rende sfocati quando si muovono.

In alcuni insetti l'accumulo spaziale e quello temporale avvengono in parallelo, in cellule più spostate verso il cervello, secondo la biologa Anna Stöckl, oggi all'Università di Würzburg, in Germania. Stöckl, ex dottoranda di Warrant, ha collocato sfingi davanti a uno schermo su cui scorreva una serie di linee bianche e nere. Quindi ha praticato un foro dietro la testa di ogni sfinge, collegando elettrodi alle cellule. L'obiettivo era stimolare i fotorecettori con ciascuna delle strisce che si alternavano e confrontarne l'attività con quella di altre cellule nervose, situate più in profondità nel lobo ottico del cervello. Questa area riceve il segnale dopo un'eventuale elaborazione o accumulo, quindi una differenza tra l'input non elaborato a livello di fotorecettore e l'output nel lobo ottico indicherebbe che il cervello ha modificato il segnale visivo.

Confrontando i valori di input e output, Stöckl ha calcolato che, quando ha portato le falene dalla luce al buio, la grandezza di un *pixel* nel loro lobo ottico è quadruplicata, una prova del fatto che usassero l'accumulo spaziale. E ha scoperto che le falene sfruttavano anche l'accumulo temporale, rallentando la visione al buio per raggruppare gli input ricevuti nell'arco di 220 millisecondi. Come ha riferito Stöckl in un articolo nel 2016, l'abbinamento permetteva alle sfingi di vedere bene con una quantità di luce 100 volte inferiore rispetto a quando non avveniva l'accumulo.

Warrant commenta: «Finora il fenomeno è stato rilevato solo nelle sfingi, ma il principio è così semplice da far ritenere che debba essere diffuso».

Un altro approccio usato dagli animali consiste nel filtrare il rumore, spiegano gli scienziati che hanno indagato su come topi e scimmie annullano il rumore visivo. Pur non potendo competere con le sfingi, di notte questi mammiferi se la cavano piuttosto bene. I ricercatori hanno scoperto che ci sono almeno due punti di soglia lungo un percorso tra i loro fotorecettori e il cervello: permettono il passaggio solo dei segnali forti, rifiutando quelli che probabilmente sono rumore. A metà di questo percorso si trovano guardiani, detti cellule bipolari dei bastoncelli. Si è scoperto che queste cellule sono impostate per mandare avanti il segnale di «fotone rilevato» solo se ricevono dai bastoncelli un input significativo. Vari fotoni che arrivano insieme sono abbastanza forti, ma non è detto che lo siano anche i fotoni singoli, e gran parte del rumore nel sistema. Sempre su questo percorso, più in profondità nel sistema ottico, c'è un secondo posto di blocco cellulare, che ferma i segnali vaganti non intercettati dal primo, oppure formati dopo quel punto. Il risultato è una visione quasi priva di rumore, spiega Petri Ala-Laurila, dell'Università di Helsinki, uno degli scienziati che hanno identificato questo processo.

Guardare avanti

Pur con tutte queste ricerche, spiega Warrant, abbiamo appena iniziato a capire la capacità degli animali di vedere al buio e le modalità con cui riescono a farlo. Ulteriori indizi possono arrivare da studi di geni e molecole fotosensibili di cui sono dotati gli animali notturni. Geni e pigmenti di alcuni lemuri notturni, per esempio, suggeriscono che possano avere occhi sensibili al blu o al verde, con cui potrebbero distinguere i semi blu e le foglie verdi al crepuscolo. E anche alcuni pipistrelli, che non sono affatto ciechi, come molti credono, hanno i geni legati alla visione a colori.

In ogni caso, se un animale ha geni e molecole in grado di rilevare il colore non è detto che il suo cervello usi queste informazioni dopo il crepuscolo. Per esempio, alcune molecole fotosensibili sono collegate al mantenimento di ritmi corporei che non hanno niente a che fare con la visione. Dunque gli scienziati devono ancora fare esperimenti comportamentali, come quelli con sfingi e rane, per dimostrare che quelle molecole sono coinvolte nella visione notturna. Quel lavoro potrebbe indicare che le molecole non sono usate al buio, o potrebbe rivelare trucchi di potenziamento della visione che non abbiamo ancora immaginato. ■

PER APPROFONDIRE

Nocturnal Colour Vision-Not as Rare as We Might Think. Kelber A. e Roth L.S.V., in «Journal of Experimental Biology», Vol. 209, n. 5, pp. 781–788, 1 marzo 2006.

Vision in Dim Light. Warrant E., in *Visual Ecology*, Cronin T.W., Johnsen S., Marshall N.J. e Warrant E.J. (*a cura*), Princeton University Press, 2014.

Vision in Dim Light. O'Carroll D. e Warrant E. (*a cura*), numero speciale di «Philosophical Transactions of the Royal Society B», Vol. 372, 5 aprile 2017.

Queste ostriche sono testate in configurazioni sperimentali per rinforzare un litorale presso Beaufort, in North Carolina.

INFRASTRUTTURE

OLTRE GLI ARGINI

Alcuni sistemi naturali possono proteggere le coste meglio delle strutture artificiali

di Rowan Jacobsen

Rowan Jacobsen è autore di *A Geography of Oysters*, *The Living Shore* e altri libri. Ha scritto sui geni di fiori estinti nel numero di aprile.

Il 27 agosto 2011 l'uragano Irene si è abbattuto sul North Carolina, devastando le Outer Banks. La tempesta ha scaricato pioggia fino all'altezza della tibia e scagliato onde di 3 metri contro le coste dell'isola barriera che si affacciava sulla terraferma, distruggendo strade e 1100 abitazioni.

Dopo la tempesta Rachel K. Gittman, una giovane ecologa allora all'Università del North Carolina a Chapel Hill, aveva deciso di ispezionare le aree colpite. Gittman aveva già lavorato come consulente per la Marina degli Stati Uniti a un progetto per la stabilizzazione delle coste ed era rimasta sconcertata dalla scarsa informazione sulla resilienza costiera. «Più proseguivo con le ricerche, più mi rendevo conto di quanto poco sappiamo», ha spiegato. «Si fanno tanta politica e gestione senza la scienza che ne è alla base». Così Gittman ha deciso di fare delle coste la sua specialità.

Quello che ha trovato è stato illuminante. Lungo le coste colpite duramente, tre quarti delle paratie erano danneggiate. I muri, solitamente in cemento e alti circa 2 metri, sono la difesa standard adottata in molte aree degli Stati Uniti dai proprietari di abitazioni per proteggersi dal mare. Tuttavia, nessuna delle coste paludose naturali era danneggiata. Le paludi, che si estendevano tra 10 e 40 metri dalla costa, non avevano perduto sedimenti o livello a causa di Irene. Nonostante la tempesta ne avesse ridotto la densità della vegetazione di più di un terzo, a un anno di distanza la flora era tornata, in molti casi più densa che mai.

Lo studio di Gittman ha confermato i sospetti di molti esperti. Le coste «corazzate», come le paratie, offrono una minor protezione di quanto si creda contro le grandi tempeste. Riflettendo l'energia dell'onda invece di disperderla, tendono a usurarsi alla base, inclinandosi verso il mare. Sebbene siano ancora efficaci nelle tempeste ordinarie, spesso si rivelano controproducenti quando le onde di tempesta si innalzano sopra di loro, aprendovi brecce o facendole collassare, abbandonando al mare ciò che vi sta intorno.

In uno studio successivo, Gittman ha effettuato un'indagine su 689 proprietari costieri, trovando che il 37 per cento delle proprietà protette da paratie aveva subito il 93 per cento dei danni. E i costi annuali di mantenimento sostenuti dai proprietari di paratie erano quattro volte quelli dei residenti che si affidavano alla natura. Le paludi salmastre si erano piegate, ma non spezzate.

Negli ultimi anni sempre più scienziati e politici sono giunti alla conclusione che le «coste viventi» – comunità naturali di paludi salmastre, mangrovie, barriere di ostriche, spiagge e barriere coralline – possono essere efficaci in una battaglia che i residenti costieri hanno continuato a perdere per anni. Le coste degli Stati Uniti si stanno disintegrando a causa di molteplici erosioni e danni da inondazioni innescati da livelli marini più alti, tempeste più forti e sviluppo incontrollato. Ogni giorno le onde strappano 89 ettari al paese. Ogni anno vanno in fumo 500 milioni di dollari di proprietà. In totale, circa il 40 per cento della costa degli Stati Uniti è soggetto a un'erosione continua.

Storicamente quasi tutti i fondi spesi per la difesa costiera sono finiti in infrastrutture «grigie»: argini, paratie, dighe e barriere rocciose. Questo sta cambiando, grazie alla crescente abilità dei ricercatori di misurare l'impatto a lungo termine delle difese costiere «verdi». Compagnie assicurative e governi ne stanno prendendo atto, e potrebbero invertire la marea a favore delle difese vive.

Le paludi meglio dei muri

Nel periodo in cui l'uragano Irene flagellava la costa orientale, Michael W. Beck, professore all'Università della California a Santa Cruz, allora scienziato marino capo a Nature Conservancy, iniziava una collaborazione con l'industria delle assicurazioni che ora potrebbe cambiare la conservazione costiera. «Molte persone sostenevano che gli ecosistemi fossero efficaci per la protezione dalle inondazioni, ma le prove erano deboli», mi racconta Beck nel suo ufficio. I meccanismi fisici erano chiari: le barriere di ostriche e di coralli limitavano l'erosione e i danni causati dalle inondazioni agendo da frangiflutti naturali e disperdendo l'energia delle onde grazie alle loro superfici corrugate. Le paludi salmastre e le mangrovie, con i loro terrapieni e le foreste di steli in grado di generare attrito, possono assorbire più del 50 per cento dell'energia delle onde di tempesta in meno di 15 metri di terreno.

Sebbene gli scienziati ne avessero compreso la fisica, nessuno l'aveva ancora posta in una forma che i politici potessero usare fa-

IN BREVE

Dati sorprendenti mostrano come in molti luoghi le paludi proteggano le coste meglio dei muri e siano più economiche da costruire.

Gli scienziati stanno perfezionando tecniche per ripristinare le zone umide danneggiate, creando configurazioni su misura per le singole coste.

Governi ed enti per la prevenzione dei disastri naturali iniziano a considerare maggiormente queste soluzioni, e i fondi sono in crescita.

Ispezione di ostriche insediatesi su un acchiappaostriche, ovvero un materiale fatto di juta e cemento, progettato per aiutare le ostriche giovani e adulte a crescere e riprodursi, proteggendo così le aree paludose che si trovano tra loro e il suolo compatto.

Fotografie di John Althouse

cilmente. Beck voleva correggere la situazione. «Se voglio cambiare le abitudini, non posso portare il mio modello di ecosistema alla Federal Emergency Management Agency (FEMA) o al corpo degli ingegneri dell'esercito degli Stati Uniti», spiega. «Devo guardare il loro modello di rischio e inserire gli ecosistemi in quel modello».

Beck e colleghi ha iniziato a collaborare con Lloyd's di Londra, Swiss Re e altre compagnie assicurative che dispongono di alcuni tra i migliori dati e modelli al mondo in tema di risorse e rischi. Quando ha inserito i dati sugli ecosistemi costieri nei loro modelli di rischio è diventato chiaro come le coste viventi fossero difese eccellenti. E, sottolinea, «quando dico ad aziende, FEMA e banche di sviluppo che questi sono i numeri forniti dalle compagnie assicurative, ho automaticamente un diverso livello di credibilità».

Il primo studio ha riguardato i danni causati dall'uragano Sandy, che ha colpito New York e il New Jersey nel 2012. Lavorando con Risk Management Solutions, compagnia leader nella modellizzazione del rischio, gli scienziati hanno mostrato che le paludi hanno prevenuto 625 milioni di dollari di danni causati dalle inondazioni seguite alla tempesta: un risultato sorprendente se si considera che le coste della regione avevano già perso tra il 60 e il 90 per cento delle loro paludi protettive. Nelle aree inondate, in media le poche paludi rimanenti avevano ridotto il rischio di inondazione dell'11 per cento. Importante è stata anche la capacità di tamponare inondazioni diffuse: secondo uno studio, le proprietà che si trovavano dietro a paludi avevano subito il 16 per cento in meno di danni annuali da inondazioni rispetto a quelle che avevano perduto le loro paludi. «È ben dentro il livello per cui ti potresti aspettare una riduzione dei premi assicurativi», sottolinea Beck.

Poi Beck e colleghi hanno applicato i loro modelli economici e di gestione dei rischi alla costa del Golfo del Messico dal Texas alla Florida, soggetta periodicamente a grandi tempeste. Hanno effettuato un'analisi di benefici e costi annuali attesi per tutti i tipi di infrastrutture. Il gruppo ha stimato che la costa subirebbe 134 miliardi di dollari di perdite in vent'anni se non fosse adottata alcuna misura preventiva. Innalzare il livello delle case potrebbe prevenire 39,4 miliardi di quelle perdite, ma costerebbe parecchio. Con una media di 83.300 dollari per abitazione, la prevenzione di 39 miliardi di dollari di danni ne costerebbe 54. Gli argini alti 6 metri costruiti in Louisiana sono stati una scelta peggiore: a 33.000 dollari al metro, sono stati un modo irragionevolmente costoso per proteggere un numero limitato di proprietà, con un solo dollaro di risparmio ogni quattro dollari spesi. Argini più bassi costruiti su terreni di fronte a diverse comunità costiere a bassa quota hanno prevenuto molti più danni a quasi lo stesso costo.

In termini di affari, i sacchi di sabbia erano il miglior investimento, con un risparmio di 8,4 miliardi di dollari di danni e una spesa di 0,84 miliardi. Anche le difese naturali si sono classificate bene. Il ripristino delle paludi, che farebbe risparmiare 18,2 miliardi di danni, costerebbe solo 2 miliardi. La ricostruzione delle barriere di ostriche potrebbe prevenire 9,7 miliardi di dollari di perdite al costo di 1,3 miliardi. Il ripristino di isole barriera offrirebbe 5,9 miliardi di dollari di prevenzione a fronte di 1,2 miliardi di spesa. E nel Golfo orientale il «ripascimento» (il riempimento di spiagge esaurite con sabbia dragata dal fondo marino) potrebbe far risparmiare 9,3 miliardi di dollari per 5,5 miliardi di costi.

Quest'ultimo dato ha sorpreso molti, perché il ripascimento annuale della spiaggia è spesso percepito come una perdita di tempo. «Se mi dessi come uniche scelte ripascimento e infrastrutture grigie – dice Beck – opterei per la prima come minore tra due mali». In totale, lo studio ha trovato che 57,4 dei 134 miliardi di dollari di perdite potrebbero essere prevenuti in maniera economicamente vantaggiosa, frazione che sale alla quasi totalità in caso di impiego di infrastrutture verdi.

Un tipo di ripristino non considerato nello studio è la deviazione su ampia scala del fiume Mississippi. Deviare acqua ricca di sedimenti attraverso un'apertura negli argini del fiume e permettere a quei sedimenti di filtrare nelle paludi in difficoltà potrebbe ripristinarne salute e livello. Tuttavia la subduzione in quella regione è così veloce, che neppure un fiume fangoso come il Mississippi può salvarla dall'invasione del mare. «Ricreare un intero ecosistema sarà un'attività costosa – afferma Beck – ed è meglio e più economico iniziare quanto prima».

Un ripristino vantaggioso dal punto di vista economico potrebbe rivelarsi complicato anche su coste lunghe e sabbiose. Spiagge e isole barriere sono fuggevoli di natura. Piantare erba per ricostruire le dune può aiutare a trattenere le spiagge sul posto, ma in molti casi solo temporaneamente. Prima o poi, i residenti dovranno indietreggiare di fronte alla costa che si ritira.

Beck sottolinea che le infrastrutture artificiali sono ancora molto importanti, e che il lato economico non è l'unico da considerare. «Ovunque ci sia una quantità significativa di persone e proprietà – dice – le soluzioni naturali saranno usate insieme a qualche infra-

struttura artificiale». Aree metropolitane, porti e altri luoghi dove la tolleranza del rischio di grandi inondazioni sarebbe molto bassa hanno bisogno di argini, sebbene non siano economicamente vantaggiosi. Ma, sostiene Beck, alcune aree popolate possono trarre vantaggi da un approccio ibrido. «Se si costruiscono argini, possono essere più bassi se di fronte ci sono paludi».

Sbagliando s'impara

Una ragione per cui le coste viventi sono un approccio economicamente sostenibile per la difesa dei litorali è che ricercatori e città sono sempre più abili nel ricostruirle. I primi progetti per il ripristino delle paludi, che seguivano la scienza forestale e assegnavano a ogni pianta molto spazio per evitare competizioni, erano in realtà controproducenti. Nelle piane di marea, «quando le piante di palude sono insieme, condividono l'ossigeno, e il loro tasso di crescita è due volte più grande», dice Brian Silliman, ecologo della Duke University. Fate mettere loro radici in grossi gruppi e il tasso di crescita di ogni pianta può triplicare. Aggiungete i granchi reali, i quali mangiano le lumache che si nutrono di erbe delle paludi salmastre, e le piante faranno ancora meglio.

Gli scienziati hanno anche scoperto che le paludi rendono al meglio se hanno un argine che fronteggia il bordo dell'erba verso il mare. Composto di materiale duro come gusci, pietra o cemento, altezza e posizione dell'argine sono scelte in modo che sia coperto dall'alta marea, ma non da quella bassa. La struttura assorbe l'impatto dell'energia dell'onda ma trattiene i sedimenti dietro di sé, permettendo all'erba di prosperare e al suolo della palude di conservare il livello e addirittura di alzarsi.

Le barriere coralline sono le più sottovalutate tra le barriere naturali

Quasi tutti i materiali rigidi possono essere usati per creare argini efficaci. I progetti su larga scala per la stabilizzazione delle coste impiegano grandi macigni o blocchi di cemento; per alcuni esperti, però, queste strutture sono coste viventi solo di nome. Ma molte operazioni di ripristino di minor profilo integrano argini nell'habitat naturale. Storicamente, nelle regioni del sud-est e della costa del Golfo degli Stati Uniti le paludi avevano un argine naturale sotto forma di una barriera intertidale di ostriche. Tempo fa molte di queste barriere sono state oggetto di una raccolta eccessiva, rovinando l'argine ed esponendo le paludi all'erosione.

In queste acque calde e favorevoli alle ostriche si possono formare nuovi argini ponendo un substrato rigido lungo la linea di bassa marea al limitare della palude, permettendo alle giovani ostriche di insediarsi. Alcuni siti con attività ondosa elevata hanno sfruttato piccole strutture di cemento cave o sacchi in rete di plastica (tipo quelli per le cipolle) riempiti con gusci e legati tra loro. Se efficaci, questi materiali artificiali sono coperti rapidamente dalle ostriche per scomparire negli interstizi della barriera crescente. Ma spesso il cemento resta visibile per anni e i sacchi sono stati criticati perché si rompono, liberando plastica nell'ambiente.

Gittman, ora alla University of East Carolina, sta testando un materiale alternativo detto acchiappaostriche, fatto di un tessuto di juta immerso in cemento Portland e arrotolato in varie configurazioni concave. Il tessuto si indurisce offrendo un'estesa superficie per ospitare larve di ostriche. Oltre a essere leggero e flessibile, resiste proprio quanto basta per permettere a una barriera di formarsi, per poi dissolversi. Il prodotto ha affrontato il suo primo test importante lo scorso autunno, quando gli uragani Florence e Michael hanno colpito il North Carolina. Michael ha trascinato sacchi di gusci nelle paludi, ma le barriere di acchiappaostriche non si sono mosse. L'esperienza è stata incoraggiante, ma Gittman teme che i gruppi che si occupano di conservazione possano gonfiarne il potenziale. «Una costa vivente non può salvare una casa da una tempesta di categoria cinque, come neppure una paratia».

Gittman e Beck sottolineano il bisogno di adattare le coste viventi alle condizioni locali. Una ragione per cui il ripristino delle ostriche è vantaggioso economicamente nel Golfo e nel sud-est degli Stati Uniti è che tante ostriche selvatiche hanno colonizzato le barriere con giovani esemplari. Ma questo non vale per gran parte del paese. La baia di Chesapeake, per esempio, è stata il simbolo di un ripristino inefficace. Le popolazioni nella baia erano precipitate a meno dell'1 per cento dei valori storici: decenni di sforzi e decine di milioni di dollari hanno avuto un impatto minimo.

«La baia di Chesapeake non era il nostro miglior modello», dice Beck. «Il ripristino delle barriere di ostriche è stato rinviato, facendole apparire difficili e costose. In un sistema di cui è rimasto solo l'1 per cento, che cosa ci si può aspettare? Non è semplice. Nel Golfo del Messico c'è ancora il 50 per cento delle barriere, è un'altra storia. Se si ricostruiscono, le ostriche torneranno».

Beck estende la lezione al caso delle barriere coralline, le più sottovalutate tra le barriere naturali. «Sono il più efficace ecosistema per la riduzione del rischio di inondazioni», dice. I coralli, che si sono evoluti per resistere a condizioni che distruggerebbero la maggior parte degli altri esseri viventi, formano argini naturali esattamente dove li vorremmo: appena al largo, di fronte a *resort*, città sulla spiaggia, strade costiere e altri beni di valore. Quando sono in salute, sono frangiflutti estremamente efficaci, capaci di ridurre l'energia delle onde perfino del 97 per cento. Sono anche convenienti dal punto di vista economico: il ripristino di una barriera richiede in media circa 1300 dollari al metro, contro i 20.000 per la costruzione di frangiflutti artificiali. Un valutazione dell'industria delle assicurazioni sulla mitigazione del rischio da cambiamento climatico nei Caraibi ha scoperto che far rivivere barriere e mangrovie è economicamente di un ordine di grandezza più vantaggioso rispetto ad argini o frangiflutti.

Sebbene le barriere non siano presenti lungo molti fronti costieri, i benefici attesi sono significativi: più di 100 milioni di dollari per anno negli Stati Uniti e più di 400 milioni di dollari per anno in ognuno di Messico, Malaysia, Indonesia, Filippine e Cuba.

Molte barriere coralline non godono di buona salute, e la perdita di un metro di altezza della barriera raddoppia i danni causati direttamente dalle inondazioni, motivo per cui secondo Beck i progetti per il ripristino delle barriere aumenteranno. Nonostante la scienza del settore sia giovane, il potenziale è enorme, almeno finché una barriera non sia già collassata. «Alcuni di questi coralli crescono rapidamente», dice Beck. «Per esempio, in zone dell'Indonesia in cui l'habitat delle barriere è ancora buono e ci sono ancora parecchi coralli in salute attorno a piccoli siti distrutti dalla pesca con l'esplosivo, le barriere possono riformarsi in fretta».

La marea del sostegno

Ora il ripristino delle coste può ricevere l'attenzione che merita. «Le cose iniziano a cambiare», afferma Beck. L'esercito, che per decenni ha scelto soluzioni basate su infrastrutture rigide, ha lanciato l'iniziativa Engineering with Nature: qualcosa che molti pianificatori pensavano di non vedere mai. La National Oceanic and

Atmospheric Administration ha fatto delle coste viventi un elemento centrale del suo piano per la resilienza costiera. Centinaia di progetti sono stati portati a termine o sono in esecuzione. Molti sono piccoli sforzi basati su comunità, ma interventi più estesi sono sempre più comuni.

I fondi resi disponibili dall'American Recovery and Reinvestment Act del 2009 hanno aumentato significativamente le dimensioni di alcune iniziative. Chilometri di progetti basati su barriere di ostriche si trovano in Alabama, Texas e Louisiana. Il più importante è Coffee Island, al largo dell'Alabama. La battigia si era ritirata fino a un massimo di 100 metri. Nature Conservancy ha collocato una linea di sacchi di gusci e palle di cemento lunga 3 chilometri a circa 30 metri dalla costa. La barriera ha subito bloccato l'energia delle onde, permettendo alla palude di ricostituirsi. In due anni, circa 200 giovani ostriche per metro quadrato hanno colonizzato la struttura, attirando pesci, granchi e uccelli. Al di fuori della costa del Golfo e del sud-est, i progetti di ripristino potrebbero essere più ardui. La California, per esempio, è una sfida difficile. «Nella baia di San Francisco – dice Beck – è stato perso più del 90 per cento delle paludi naturali, quindi è necessario ricreare un ambiente su larga scala in un luogo assai popolato».

Gli ecologi, tra cui Rachel K. Gittman (*in bianco*), misurano i livelli di erba e acqua a Carrot Island, in North Carolina.

Ma dove c'è volontà – e denaro locale – c'è una soluzione. La San Francisco Bay Clean Water, Pollution Prevention, and Habitat Restoration Measure, approvata dai votanti nella zona della baia nel 2016, raccoglierà 25 milioni di dollari all'anno per vent'anni con una tassa. Quei 500 milioni di dollari saranno usati per costruire 40.000 ettari di zone umide – il maggior ripristino di costa negli Stati Uniti – impiegando diverse tecniche. La più innovativa riguarda argini orizzontali. Invece di un tumulo alto e stretto che fiancheggia la costa, gli argini orizzontali sono ampie strisce di terra fangosa, paludi ed erba che si alzano gradualmente dal bordo dell'acqua alla terraferma per centinaia di metri. Questi argini sono livellati con grandi quantità di terra (spesso recuperata da progetti edilizi) e contengono piccoli campioni di substrato per germinazione e radicamento di piante. Possono essere più bassi e costare il 40 per cento in meno rispetto a un argine tradizionale, perché l'ampiezza assorbe l'acqua dell'inondazione. La configurazione, inoltre, fornisce spazio alle comunità della palude, in modo che possano ritirarsi quando i mari si innalzano.

Un altro segno incoraggiante è il Living Shorelines Act. Il disegno di legge assegnerebbe 20 milioni di dollari di finanziamento all'anno a progetti sulle coste viventi. Con l'attuale Parlamento degli Stati Uniti le prospettive sono incerte, ma l'esistenza del disegno di legge mostra come le coste viventi guadagnino terreno.

Di recente la Coastal Resources Commission del North Carolina ha approvato una nuova procedura che renderà la concessione di permessi per le coste viventi facile come quella per gli argini. In Maryland è in vigore una legge ancora più forte, che richiede ai proprietari di abitazioni di provare la necessità di un argine rispetto a una costa naturale.

L'indicazione più promettente potrebbe essere l'accordo del 2018 tra Nature Conservancy, settore assicurativo e lo Stato messicano Quintana Roo per la creazione di un fondo fiduciario per proteggere la barriera corallina mesoamericana al largo di Cancún. L'accordo includerà la prima polizza assicurativa stipulata su un ecosistema naturale. Se la barriera sarà danneggiata da una tempesta, saranno sbloccati fondi assicurativi per la ricostruzione del suo capitale naturale.

Affinché le coste viventi diventino parte importante dei piani di difesa, governi, assicurazioni e responsabili dello sviluppo dovranno migliorarle e installarle prima dell'arrivo di tempeste, e finanziare i prossimi progetti con spese successive ai disastri. Questo richiede buona scienza e buoni numeri economici – che ora ci sono – e prove concrete sotto forma di progetti dimostrativi, sempre più comuni.

Il primo esempio significativo di spesa post-disastro per infrastrutture naturali potrebbe verificarsi nel momento in cui la FEMA e altre agenzie cercassero di spendere più di 100 milioni di dollari in fondi per il risarcimento da recenti uragani. Nonostante i tradizionali investimenti della FEMA in ambito di riduzione del rischio si siano focalizzati su approcci come l'acquisizione di abitazioni costiere danneggiate o il loro innalzamento, l'agenzia ha corretto la sua politica di analisi costi-benefici a favore di investimenti in infrastrutture naturali. Beck si aspetta che questo cambio porti a progetti finanziati a livello federale e con portata senza precedenti in Florida, Porto Rico e nella costa del Golfo. Altri sviluppi su larga scala potrebbero seguire in tutto il mondo, nel momento in cui governi, addetti alla gestione del rischio da disastri, imprese, banche e assicuratori cercassero di mitigare la loro esposizione ai rischi nel modo economicamente più vantaggioso possibile.

Quando questo accadrà, sarà il momento in cui la società capirà che la natura non è un lusso. È il futuro. ■

Questo articolo è stato prodotto in collaborazione con Food & Environment Reporting Network, organizzazione no profit *di giornalismo d'inchiesta.*

PER APPROFONDIRE

Marshes with and without Sills Protect Estuarine Shorelines from Erosion BetterThan Bulkheads during a Category 1 Hurricane. Gittman R.K. e altri, in «Ocean & Coastal Management», Vol. 102, parte A, pp. 94-102, dicembre 2014.

Managing Coasts with Natural Solutions: Guidelines for Measuring and Valuing theCoastal Protection Services of Mangroves and Coral Reefs. Beck M.W. e Lange G.-M (*a cura*), Banca Mondiale, gennaio 2016.

Living Shorelines Academy: **www.livingshorelinesacademy.org.**

I vincitori delle paludi. Carey J., in «Le Scienze» n. 546, febbraio 2014.

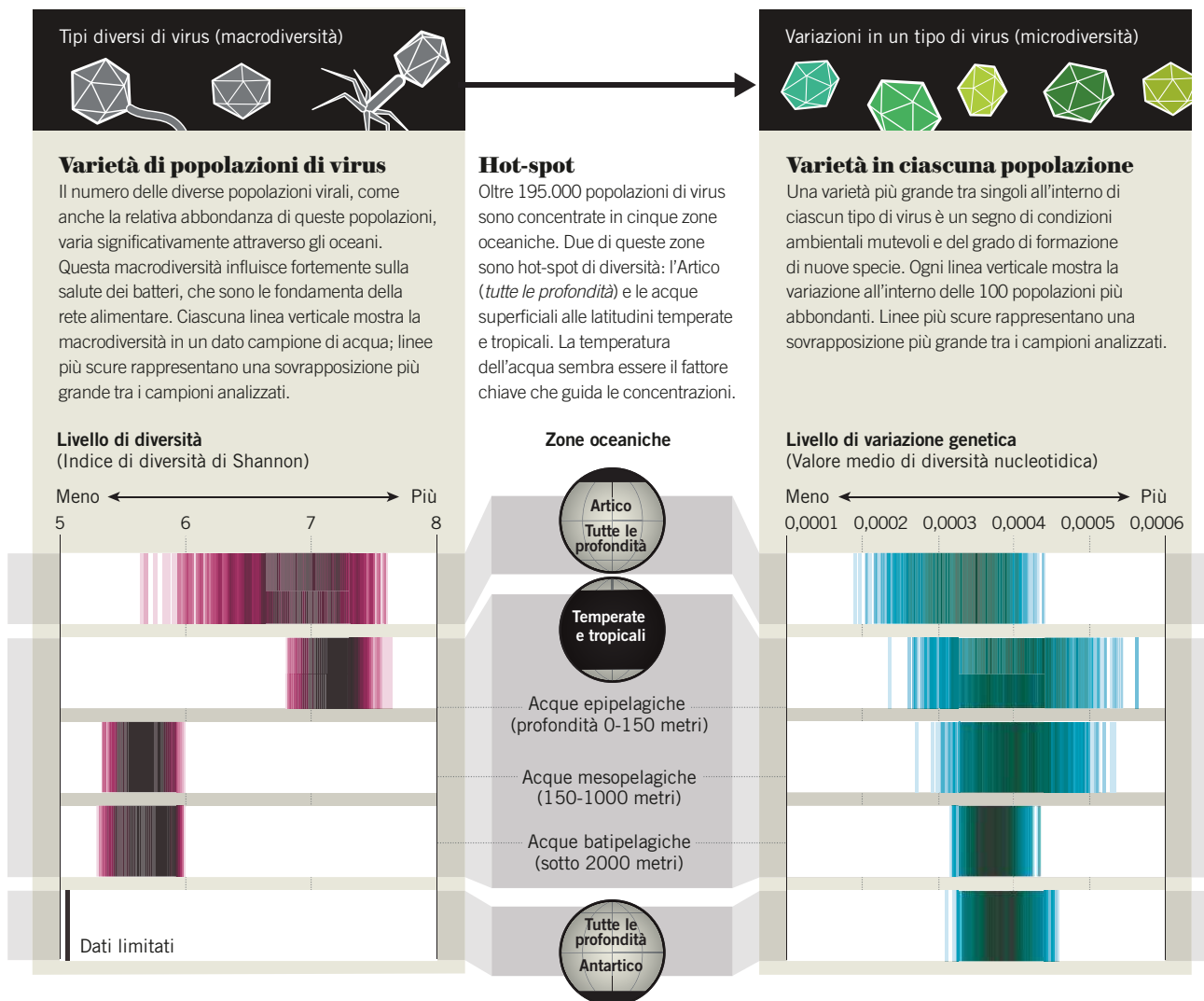
Dove prosperano i virus

Uno studio sulla presenza di questi microrganismi negli oceani ha scoperto che l'Artico ha la popolazione virale più ricca di tutti

Sebbene gli scienziati non avessero un registro dettagliato dei virus negli oceani, molti di loro avevano ipotizzato che numero e varietà di quei microrganismi diminuivano andando dall'equatore ai poli. Tuttavia si sbagliavano. Una nuova ricerca ha espanso enormemente l'insieme di dati e ha mostrato che l'Oceano Artico ha la popolazione più ricca di virus rispetto a ogni altro grande oceano. «È un *hot-spot*», sottolinea Matthew Sullivan, uno degli autori dello studio e microbiologo all'Ohio State University. Secondo Sullivan, la ragione è che nell'Oceano Artico si mescolano acque dall'Oceano Atlantico e dall'Oceano Pacifico, correnti oceaniche globali e fiumi enormi che svuotano lì. Sorprendente è anche il fatto che i virus sono concentrati in altre quattro zone marittime del pianeta (*grafico*). «Prima non lo sapevamo – ammette Sullivan – avrebbero potuto essere 20».

Mark Fischetti

Grafico di Jen Christiansen; fonte: *Marine DNA Viral Macro- and Microdiversity from Pole to Pole*, di Ann C. Gregory e altri, in «Cell», Vol. 177, n. 5, 16 maggio 2019

giornalista informatico e studioso
della disinformazione nei media

Un «Wow» da smontare

Un segnale misterioso captato oltre quarant'anni fa è ormai diventato un tormentone ufologico

Il «segnale Wow» è uno dei capisaldi dell'ufologia e della ricerca scientifica di indizi di vita intelligente extraterrestre. Fu ricevuto il 15 agosto 1977 dal radiotelescopio Big Ear dell'Ohio State University e ottenne questo nome piuttosto insolito perché l'astronomo Jerry Ehman scrisse appunto «Wow!» sul tabulato che ne mostrava le caratteristiche sorprendenti: era molto potente, aveva un'origine molto ristretta, e usava una frequenza vicina a 1420 megahertz, quella ottimale per le comunicazioni interstellari (perché attraversa facilmente le grandi nubi di polvere cosmica), con una larghezza di banda di meno di dieci chilohertz.

Questo segnale misterioso, captato una sola volta, è presentato tuttora come uno degli episodi più credibili di possibile contatto via radio con civiltà tecnologiche extraterrestri.

Una patina di mitologia

La sua fama è talmente durevole che ancora oggi periodicamente ne vengono proposte spiegazioni scientifiche alternative, come quella cometaria suggerita da Antonio Paris, professore di astronomia al St. Petersburg College, in Florida (*si veda la rubrica di luglio 2017*). Citarlo è un sistema infallibile per risvegliare l'attenzione dei mezzi di comunicazione generalisti e acquisire notorietà.

Ma quando c'è di mezzo la scienza e c'è clamore mediatico è indispensabile togliere di mezzo l'inevitabile patina di mitologia che offusca i fatti. Lo ha fatto di recente nientemeno che Jill Tarter, astrofisica che per anni ha diretto il centro SETI, dedicato alla ricerca scientifica di indicatori astronomici di tecnologie non terrestri. Il suo lavoro in questo campo ha ispirato il personaggio di Ellie Arroway nel film *Contact* (1997) di Bob Zemeckis, tratto dall'omonimo romanzo dell'astronomo Carl Sagan.

Tarter è insomma indiscutibilmente favorevole all'ipotesi di intelligenze aliene, eppure ha stroncato con i fatti il mito del «segnale Wow» durante il festival della comunicazione scientifica Starmus tenutosi di recente a Zurigo. Il radiotelescopio che lo registrò, ha spiegato Tarter, era dotato di due ricevitori, e un segnale che fosse realmente arrivato dallo spazio sarebbe stato captato prima da uno dei ricevitori e poi dall'altro. Lo strumento era fisso e il suo puntamento variava seguendo la rotazione terrestre, per cui i suoi ricevitori inquadravano la stessa zona di cielo uno dopo l'altro. Il segnale però fu capitato solo da uno dei due ricevitori, e quindi è estremamente improbabile che provenisse realmente dallo spazio.

Smentito da tempo

Questo dettaglio decisivo dei due punti separati di captazione viene spesso taciuto o dimenticato nel racconto del mito del «segnale Wow», ma in realtà è già presente nelle parole scritte dallo stesso Ehman oltre vent'anni fa sul sito web del radiotelescopio, bigear.org. Ehman confermò che il segnale misterioso fu ricevuto da uno solo dei due punti, e in effetti il famoso tabulato del segnale contiene un solo picco anziché due.

Il *debunking* della vicenda, insomma, era lì da leggere da vent'anni, eppure la leggenda del possibile contatto radio extraterrestre si è diffusa lo stesso, sommergendo per pura quantità i resoconti originali. È un fenomeno che si verifica spesso quando c'è di mezzo una storia accattivante: i fatti che la stroncano vengono tralasciati e quelli che la avvalorano sono amplificati.

Per esempio, quando fu coniato il termine «dischi volanti», nel 1947, non indicava la forma degli oggetti non identificati, ma il modo in cui si muovevano nel cielo, come piatti fatti rimbalzare sul pelo dell'acqua. Eppure l'iconografia ufologica rappresenta quasi sempre oggetti a forma di disco e il significato originale si è perso. È così che si costruiscono i miti.

di Beatrice Mautino

biotecnologa, giornalista e comunicatrice scientifica. Tra i suoi libri più recenti *Il trucco c'è e si vede* (Chiarelettere, 2018)

Il marketing secondo l'Europa

Un regolamento della Commissione Europea stabilisce sei criteri fondamentali per la pubblicità dei cosmetici

È entrato in vigore a luglio e potrebbe cambiare radicalmente la pubblicità dei cosmetici. Di sicuro, il *Technical Document on Cosmetics Claims* renderà la vita difficile agli addetti al marketing delle aziende che potrebbero avere meno libertà nell'uso dei cosiddetti «claim», cioè di quelle dichiarazioni che compaiono sulle confezioni dei prodotti e ne decantano le proprietà.

Trovare un equilibrio

Sono anni che la Commissione Europea prova a regolamentare il settore, ma non è un'impresa semplice. È necessario trovare un equilibrio tra le informazioni che devono esserci per poter permettere al consumatore di scegliere il prodotto che più si addice alle sue esigenze e i trucchi che il marketing mette in atto per invogliare i consumatori a preferire alcuni prodotti a scapito di altri.

La Commissione ha provato a risolvere il problema con il Regolamento 655/2013 che stabilisce criteri comuni che permettono di tutelare i consumatori dai claim ingannevoli. Il regolamento stabilisce che le dichiarazioni devono sottostare a sei criteri fondamentali che vanno dalla necessità di provare quanto dichiarano, all'obbligo di dire la verità fino alla correttezza nei confronti dei consumatori e dei concorrenti. In pratica, la pubblicità ce la può raccontare, ma entro certi limiti. Tra questi, ce ne sono alcuni che sono violati più spesso, come il criterio di correttezza che specifica che i claim «devono essere obiettivi e non denigrare i prodotti della concorrenza, né denigrare ingredienti legalmente utilizzati».

Il documento appena entrato in vigore si inserisce in maniera diretta e concreta proprio nel tema dei prodotti «senza» con l'obiettivo di fornire uno strumento agli Stati membri per valutare caso per caso e prendere provvedimenti. Nello specifico, non dovremmo più vedere dichiarazioni che vantino l'assenza di un ingrediente vietato, come «senza corticosteroidi», ma anche «senza nichel» visto che si tratta di ingredienti non ammessi nel Regolamento e quindi indicarne l'assenza è superfluo oltre che ingannevole perché porta a pensare che invece gli altri prodotti li contengano. Dichiarare che un prodotto è «senza conservanti» sarà possibile, ma solo se nessun sistema conservante sarà davvero presente, così come non si dovrebbe poter scrivere «senza formaldeide» se il prodotto contiene degli ingredienti che la rilasciano o «senza SLS» se il prodotto contiene, per esempio, Coco-solfato che è in buona parte SLS.

Non dovremmo nemmeno più vedere prodotti che vantino di essere «privi di allergeni», visto che il rischio di reazioni allergiche non si può escludere completamente e «il prodotto non deve dare l'idea che lo faccia».

Un alleato per la trasparenza

Infine, non dovrebbe più essere possibile vantare l'assenza di ingredienti autorizzati, come per esempio i parabeni o il fenossietanolo. Su questo punto si giocherà il grosso della partita tra enti di controllo e aziende, perché parliamo di dichiarazioni molto utili al marketing e che vanno a soddisfare le esigenze di nicchie di mercato che vogliono poter scegliere in maniera trasparente.

Ma è anche vero che indicare in etichetta l'assenza di un prodotto sicuro, lo rende di fatto insicuro agli occhi di chi lo compra o quantomeno genera confusione. Sarà invece possibile indicare l'assenza di ingredienti che rispondono a specifiche esigenze, come l'assenza di alcool in un collutorio usato da tutta la famiglia, anche dai bambini, o l'assenza di ingredienti di origine animale in prodotti destinati a consumatori vegani.

Il documento non è una legge, quindi non ci sono obblighi per le aziende, tuttavia i consumatori e gli enti di controllo adesso possono contare su un alleato in più nella battaglia per la trasparenza.

di Dario Bressanini

chimico, divulgatore, gastronomo. Autore di *Contro natura* (Rizzoli, 2015), *La Scienza della Carne* (Gribaudo, 2016)

L'aroma del pomodoro di una volta

La colpa principale della perdita di gusto dipende da come viene trattato dopo la raccolta. Anche a casa

«I pomodori moderni non sono gustosi come quelli di una volta!». È una frase che si sente spesso dire, almeno da parte di chi ha avuto modo di assaggiare il gusto dei pomodori di almeno mezzo secolo fa.

Questa frase è ormai diventata un luogo comune, non solo per i pomodori ma per praticamente ogni alimento, dalle fragole al latte. Sarebbe sincero ammettere che c'è sempre un pizzico di nostalgia in questi discorsi, ricordando un periodo in cui, indipendentemente dal vero gusto dei pomodori, eravamo più giovani. E questo, forse, falsa i nostri ricordi.

Nel caso dei pomodori però qualche cosa di vero c'è: alcuni studi hanno mostrato come le varietà moderne ottenute col miglioramento genetico abbiano un po' meno aroma di quelle di una volta, meno produttive e meno adatte alle esigenze dell'industria alimentare moderna. Tuttavia la colpa principale dello scarso gusto che attribuiamo ai pomodori freschi moderni è da ricercare in come viene trattato dopo la raccolta, e a volte la colpa è proprio del consumatore.

Temperatura ottimale

Il gusto del pomodoro è dato dall'unione del sapore, che percepiamo in bocca tramite le papille gustative, e dell'odore, che sentiamo nel naso. Il sapore del pomodoro maturo è caratterizzato da una buona acidità controbilanciata da una dolcezza adeguata. Pomodori con bassa acidità e basso contenuto zuccherino sono percepiti come blandi. Se hanno solo gli zuccheri elevati il sapore non spicca mentre se sono solo acidi il pomodoro non è gradevole da consumare.

Per l'aroma sono invece fondamentali molte molecole volatili la cui produzione aumenta nelle fasi finali della maturazione. I pomodori al supermercato non sono conservati nei banchi frigoriferi ma a temperatura ambiente, e così sarebbe meglio conservarli a casa per preservare il loro aroma e sapore fino al massimo della maturazione dopodiché dovrebbero essere consumati subito.

La temperatura ottimale di maturazione e di conservazione dei pomodori è tra i 13 °C e i 22 °C. I pomodori però sono ortaggi estivi e sfortunatamente questa non è la temperatura tipica di una cucina italiana d'estate. Quindi molte persone conservano i pomodori in frigorifero, a circa 4 °C. Uno studio del 2013 pubblicato su «Food Chemistry», confrontando pomodori maturi conservati a 4 °C con quelli tenuti a 20 °C, ha scoperto che le quantità di acidi e zuccheri, che contribuiscono al sapore, non vengono alterate dal raffreddamento. Per quel che riguarda gli aromi invece è tutta un'altra storia: il freddo riduce fortemente la produzione di alcune molecole volatili fondamentali per l'odore.

Tre giorni

Uno studio del 2016 fornisce dei consigli: se il pomodoro è maturo potete tenerlo fino al massimo tre giorni in frigorifero senza che perda aroma. A patto però di riportarlo a temperatura ambiente e tenercelo per un giorno intero prima del consumo. Se invece ve lo dimenticate in frigo una settimana intera avrà perso il 65 per cento dell'aroma, e anche il giorno intero passato a temperatura ambiente non servirà granché a migliorare il profumo.

Ovviamente non potete sapere se dalla raccolta in campo al bancone del supermercato sono già stati refrigerati, nel qual caso queste precauzioni sono inutili e fate bene a tenerli in frigo per aumentarne la durata, tanto l'aroma è perso comunque. Ma almeno riportateli a temperatura ambiente prima di mangiarli. Nel caso fortunato abbiate un orto e possiate cogliere dei pomodori maturi, beh, mangiateli subito. Se invece non sono ancora maturi teneteli a temperatura ambiente fino a maturazione e poi, se proprio dovete, al massimo per tre giorni in frigo.

Il freddo del frigorifero non altera le quantità delle sostanze che contribuiscono al sapore dei pomodori ma riduce la produzione di alcune molecole volatili fondamentali per il loro aroma.

Piotr e Rudy hanno piantato una serie di piccoli alberi su cui si sono subito posate delle rondini, come ha scoperto la gatta Gaetanagnesi

La foresta del massimo disordine

Non è insolito rientrare sudati in casa in un tardo pomeriggio d'agosto; di solito accade per aver fatto movimento sportivo o comunque giocoso, e al sudore si accompagnano quasi sempre sorrisi di soddisfazione. Nel caso specifico che ci apprestiamo a raccontare, tuttavia, il sorriso di soddisfazione campeggia solo sulla faccia del dottor Piotr Silverbrahms.

«Ecco fatto, Treccia! Puoi essere fiera di noi: nonostante le temperature che neppure un Tokamak surriscaldato osa immaginare, un gran numero di alberi maestosi fa ora mostra di sé nel nostro giardino!»

Alice alza un dubbioso sopracciglio e dice qualcosa; Rudy volta la testa di scatto e dice anche lui qualcosa in perfetto sincrono con Alice: dicono però cose diverse, le parole si sovrappongono e il suono risultante è qualcosa che assomiglia ad «asbestosi».

«Eh? – protesta Piotr – non vi hanno insegnato a parlare uno alla volta? Prima le signore, suvvia: puoi ripetere, Treccia?»

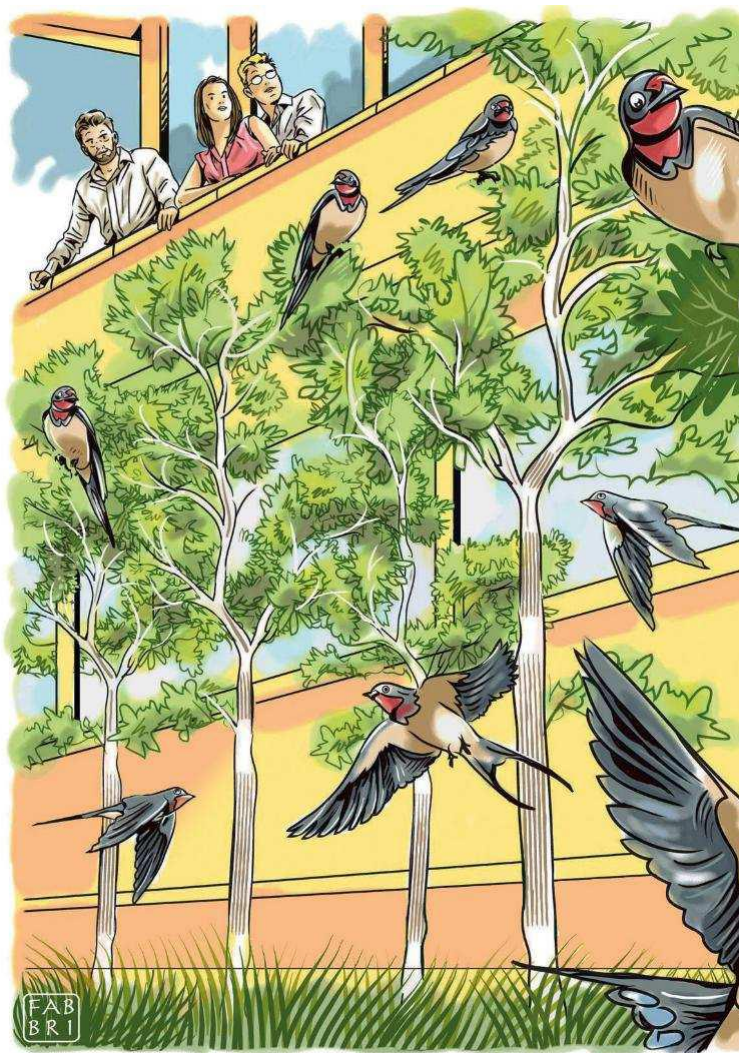
«Maestosi», sillaba Alice: «Ho solo ripetuto il tuo "maestosi", aggiungendo un punto interrogativo finale e una punta di sarcasmo che è difficile riprodurre con la sola punteggiatura. A me sembrano alberelli giovanissimi e striminziti, come è naturale che siano, peraltro. Volevo anche ripetere l'intonazione accennando al tuo "gran numero", ma c'è stato lo scontro di esclamazioni con Rudy, quindi non ho infierito.»

«E io ho solo ripetuto il tuo "abbiamo" – interviene Rudy – con lo stesso tono sarcastico, solo un po' più stanco. Gli alberi li ho piantati tutti io, tu hai solo fatto il *designer* creativo, ripetendo istericamente "questo qui, quest'altro qua", per tutto il tempo.»

«Non mi stupisce la tua capacità di scansare le fatiche, Doc; in questo diventi sempre più bravo, anche quando mi sembra impossibile migliorare – dice Alice – ma a giudicare dal risultato che vedo dalla finestra mi sembra che non ci fosse questo gran bisogno di precisione: quel gruppetto di alberelli sembra piantato del tutto a caso...»

«Visto?», esclama Doc con un sorriso a 32 denti rivolto a Rudy: «Esattamente quello che volevamo! La foresta del massimo disordine!»

La faccia di Alice si trasforma in un grande, virtuale punto interrogativo. Lasciandosi cadere sul divano, Rudy la guarda sconsolato: «Lascia stare, Treccia, io ci ho rinunciato da tempo. Questo occhialuto bellimbusto non ha fatto altro che misurare tutte le distanze relative tra gli alberelli che piantavo, e l'unica cosa che sembrava interessargli era che tutte le distanze fossero chiaramente diverse l'una dall'altra. Mentre io lavoravo di zappa e vanga, lui metteva qualcosa sugli alberelli e confabulava con Gaetanagnesi. La mia stima verso quella gatta rischia di decrescere velocemente, se continuerà a frequentare certe compagnie.»

Illustrazione di Stefano Fabbri

«Finirà con rovinarmi definitivamente quella micia. A proposito, qualcuno sa dove sia finita? Non la vedo in casa...»

«Sta in giardino», ridacchia Piotr; «Venite alla finestra. Scommetto che ci sarà da divertirsi...»

Alice e Rudy, abbastanza controvoglia, si affiancano a Piotr alla finestra. I tre vedono la gatta sbirciare in alto, verso di loro, e subito dopo lanciarsi come una tigre proprio attraverso il boschetto di alberelli appena piantati, miagolando e sbuffando come una nera, piccola tigre. Da ogni alberello si alza in volo una rondine, che subito si posa nuovamente sull'alberello più vicino a quello di partenza.

di Rodolfo Clerico,
Piero Fabbri e
Francesca Ortenzio

La soluzione del problema esposto in queste pagine sarà pubblicata in forma breve a settembre e in forma estesa sul nostro sito: www.lescienze.it. Potete mandare le vostre risposte all'indirizzo e-mail: rudi@lescienze.it.

IL PROBLEMA DI LUGLIO

Il problema del mese scorso riguardava cinque personaggi che, indossando cappucci (tra sei disponibili) corredati dai primi sei numeri naturali e potendo ognuno vedere i numeri dei compagni ma non il proprio, pronunciano il numero più grande e il numero più piccolo che vedono, e devono indovinare il proprio. È evidente che i due numeri più alti dell'insieme sono facilmente individuabili: il maggiore è pronunciato da tutti tranne che da colui che lo indossa; il secondo è subito riconosciuto dal portatore del numero più grande (è il «numero più grande» enunciato da lui), e tutti gli altri possono facilmente dedurlo a loro volta. Lo stesso vale anche per i due numeri più piccoli.

Quindi, detti $a_1 < a_2 < a_3 < a_4 < a_5$ i numeri sui cappucci, a_1, a_2, a_4 e a_5 sono certamente enunciati da qualcuno, e tutti i portatori di questi numeri sono in grado di dedurre con certezza il proprio. Non verrà mai pronunciato invece il numero a_3; chi lo indossa, peraltro, vede tutti i quattro numeri pronunciati e sa pertanto di essere il portatore di a_3. La «probabilità che tutti conoscano con certezza il proprio numero» si riduce pertanto alla probabilità che il portatore di a_3 conosca il proprio: questo avverrà se tra a_2 e a_4 c'è spazio per un solo numero: se invece $a_4 - a_2 = 3$, il portatore di a_3 potrà solo provare a indovinarlo, con probabilità 0,5. Si vede che se tra i sei cappucci disponibili quello non indossato ha il numero 1, 2, 5 o 6, il numero a_3 potrà essere individuato con certezza: se invece il cappuccio escluso è il 3 o 4, questo non può avvenire. Ne segue che la probabilità che tutti «conoscano con certezza il proprio numero» è 2/3 (trascurando il fatto che il portatore di a_3 può comunque «indovinare» il proprio con probabilità 0,5).

La formula generale per n cappucci e k persone è data dal rapporto tra due coefficienti binomiali: $\frac{\binom{n-k+3}{3}}{\binom{n}{k}}$, che è funzione tutt'altro che ottimistica.

«Ah-ha! Visto? Visto? Proprio come immaginavo!», esclama Piotr con espressione deliziata.

La dottoressa Riddle corruga la fronte, mentre il dottor D'Alembert non riesce a produrre altro che una smorfia.

«Capito, testoni?», prosegue affabile Piotr. «Su ogni alberello si era posata una rondine, e quando il nostro splendido felino si è lanciato nel boschetto, le rondini si sono spostate da un albero a quello più vicino! Quindi, la condizione del problema è rispettata!»

La smorfia sul volto di Rudy peggiora a vista d'occhio; la fronte corrugata di Alice somiglia sempre di più a una collezione di piccoli Grand Canyon.

«Di quale maledetto problema stai parlando, Doc?»

«Ma lo avete praticamente visto in atto! Avrete ben notato che su ogni giovane albero si era posata esattamente una rondine, e...»

«Rudy, quanti alberelli hai piantato?», chiede brusca Alice. Prima che Rudy possa rispondere, Piotr riprende a parlare.

«Non importa, Treccia! Alla fin fine, il numero *N* di alberi e rondini è solo un parametro! Anzi, la questione è proprio questa: dopo che ogni rondine ha cambiato albero, può capitare che sullo stesso albero si posino due rondini; ma per quali valori di *N* si avrà la certezza che ci sarà almeno un albero con almeno due rondini?»

«Hai infilato due "almeno" in una sola frase. Nonostante la tua abominevole passione per gli avverbi sia ben nota, immagino che non sia ancora finita, vero?»

«Ma certo! È anche naturale chiedersi se esiste un numero **massimo** di rondini che si possano ritrovare sullo stesso albero, dopo il piccolo volo di migrazione.»

«Ah, ecco. Tu che ne dici, Rudy?»

Rudy si alza dal divano, posa la pipa e si avvicina alla porta, vicino alla quale sono ancora posate zappa e vanga: «Beh, ora è chiaro perché fosse necessario che tutte le distanze relative degli alberelli fossero diverse tra loro: perché le rondini potessero individuare con facilità l'albero più vicino al proprio. E immagino che quel che Doc metteva sugli alberi dopo che li avevo piantati fosse una sorta di delizia gastronomica per rondini, in grado di attirarle: probabilmente qualcosa anche un po' pesante, di modo che i volatili, pur spaventati, potessero spiccare il volo a fatica, quel tanto che bastava a cambiare albero, non certo a librarsi leggeri nel cielo. Se queste premesse sono giuste, risolvere il problema è facile.»

Piotr guarda ammirato l'amico: «Dovevo aspettarmelo, da uno come te. Premesse correttissime, GC! Hai davvero già risolto il problema?»

«Certo», sorride Rudy, prendendo in mano zappa e vanga: «Ma non solo questo: risolvo subito anche il più grande problema della mia vita: ti porto giù in giardino e ti pianto come un alberello in mezzo al tuo boschetto, dannato schiavista!»

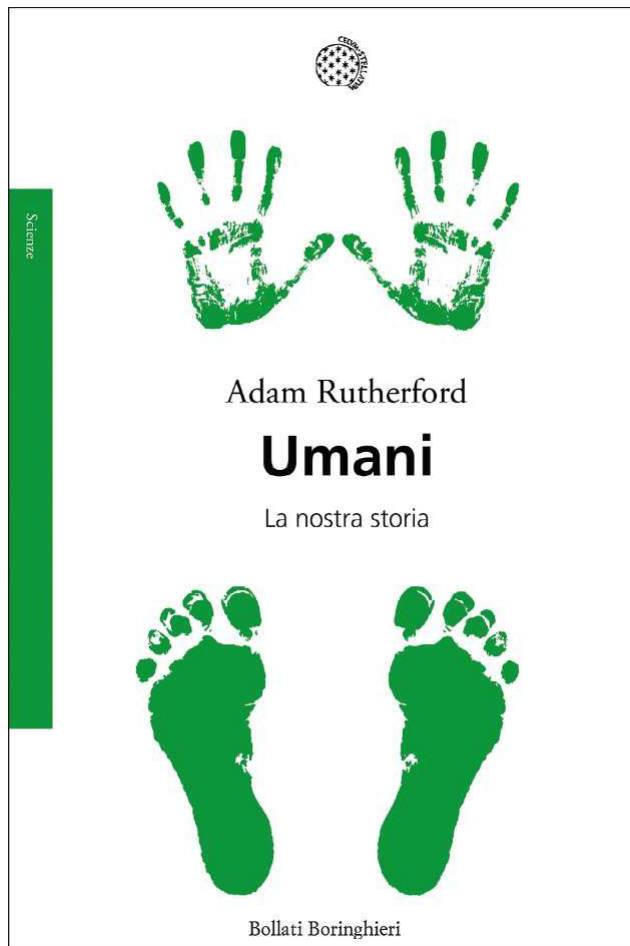
Siamo speciali, ma non troppo

Una ricomposizione del puzzle umano rintracciando tasselli anche da altri animali

Umani
di Adam Rutherford
Bollati Boringhieri, Torino, 2019, pp. 230 (euro 24,00)

Gli scimpanzé possono essere «alla moda», o diventare brutali infanticidi e cannibali. Una lucertola può avere il ruolo di sposa cadavere, mentre i delfini maschi a volte mettono in atto stupri di gruppo. Gli elefanti riescono a riconoscersi allo specchio e alcuni uccelli usano il fuoco per la caccia. Insomma, ovunque guardiamo nel mondo degli animali troviamo caratteristiche che riconosciamo come umane. Certo, abbiamo capacità intellettuali diverse, ma manteniamo saldi legami con la nostra origine animale. È l'evoluzione darwiniana, fatta di piccoli aggiustamenti e riutilizzi, che ha poi dato vita al nostro cervello e alle sue capacità di evoluzione culturale. È stata quest'ultima a conferire qualcosa di unico alla nostra specie e anche a darci una sorta di spocchia nei confronti degli altri viventi.

È successo qualcosa, molto recentemente sulla scala temporale della vita, che ha proiettato una delle tante specie di *Homo* verso una nuova dimensione: circa 45.000 anni fa (o forse prima) abbiamo iniziato a produrre cultura in modo nuovo, accumulando conoscenze, diffondendo idee e abilità a una velocità mai vista. I Neanderthal – con i quali siamo entrati in contatto una volta usciti dall'Africa, 80.000 anni fa e dei quali conserviamo qualche eredità genetica – mostravano anche loro segni di comportamento cognitivamente moderno: uso del fuoco, produzione di arte astratta, uso di strumenti complessi. Si sono estinti poco dopo il nostro arrivo, forse proprio a causa nostra, ma erano comunque sopravvissuti qualche centinaio di migliaia di anni, più di quanto *H. sapiens* ha calcato la Terra finora. Siamo speciali, ma non lo è la nostra biologia: è il messaggio principale di questo appassionante libro.

Viaggiando nel tempo e nello spazio, cioè nell'evoluzione della nostra specie e nella biodiversità attuale, Rutherford ricompone il puzzle umano rintracciando i diversi tasselli nel regno animale passato e presente. Un'efficace strategia retorica per sottolineare quanto davvero non ci sia praticamente nulla «contro natura» nei nostri comportamenti, dall'omosessualità allo stupro, passando per lo scambio di sesso in cambio di favori, l'uso di strumenti, e la creazione e la trasmissione culturale di specifici comportamenti. La meravigliosa diversità della natura è limitata solo dalla nostra osservazione: negli ultimi decenni lo sviluppo dell'etologia ha fatto sì che quasi nessuna specie conosciuta rimanesse al riparo dello sguardo dei ricercatori. Sappiamo quindi che i maschi delle giraffe praticano l'omosessualità abitualmente, e molto più spesso del sesso eterosessuale a scopo riproduttivo, e che tursiopi di Shark Bay in Australia si tramandano l'uso di spugne da infilare sul muso per rendere più facile e meno dolorosa la caccia a ricci di mare o granchi. Ma solo alcune femmine sono a parte di questa tradizione. Ovviamente, la complessità di questi comportamenti appresi e tramandati è maggiore nei primati, e proprio la capacità di conservare e trasmettere le innovazioni è ciò che rende molto più efficace l'evoluzione culturale della nostra specie.

Ma è impossibile separare l'evoluzione culturale da quella biologica: «Si crea un falso discrimine fra l'una e l'altra, quando invece sono intrinsecamente interdipendenti» in un continuo stimolo reciproco. Ci sono ancora molte cose da studiare, soprattutto per eliminare i pregiudizi antropocentrici nella ricerca. Oggi ci sono meno remore nel raccontare ciò che si osserva: durante la spedizione polare di Scott all'inizio del Novecento, alcuni comportamenti necrofili dei pinguini furono censurati nella pubblicazione del resoconto dell'esplorazione. Per la ricerca etologica la sfida del futuro (oltre alla conservazione della biodiversità) è togliere l'umanità dalla nostra prospettiva, per capire come siamo diventati umani.

Mauro Capocci

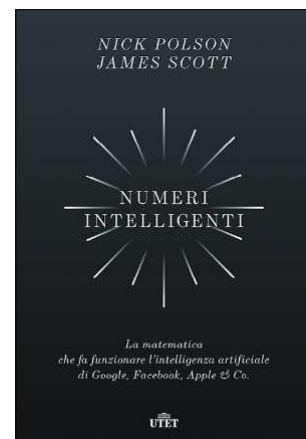
Gli antenati degli algoritmi

Le radici culturali di intelligenza artificiale e deep learning

Nel 2011 un gruppetto di produttori televisivi sta cercando una canale disposto a investire sulla loro nuova idea. Sono quasi sull'orlo della disperazione, perché nessuno ha trovato la loro proposta sufficientemente convincente per una puntata pilota. Ma alla fine bussano alla porta giusta, quella di Netflix, e poco più di un anno dopo *House of Cards* viene distribuito e il mondo delle serie televisive non è più lo stesso. Ma che cosa sapevano i manager della piattaforma di *streaming* che gli altri non sapevano? Semplicemente, Netflix conosce molto meglio di tutti gli altri *network* televisivi il proprio pubblico. Il segreto era (ed è) nell'algoritmo che ci suggerisce la prossima serie e che nel 2011 era in grado di dire che una serie sul potere politico con un protagonista spregiudicato era quello che milioni di spettatori avrebbero voluto vedere.

È solo un aneddoto, arcinoto, su come algoritmi e statistiche, uniti a enormi quantità di dati, abbiano cambiato il nostro modo di vivere. In questi casi, gli esperti parlano di tecnologie *disruptive*, dirompenti per gli effetti che producono. Ma il libro di Polson e Scott, statistico il primo e *data scientist* il secondo, non è l'ennesima spiegazione di come funzionino algoritmi e *big data* (che pure è uno dei fini secondari del volume). Il loro è il tentativo di mostrare le radici culturali di molte idee matematiche che hanno portato allo sviluppo di intelligenza artificiale e *deep learning* di oggi. Ci si ritrova così avvinti da storie incredibili, raccontate con bel piglio narrativo, come quella di Florence Nightingale, che nella guerra di Crimea nel XIX secolo, mostra l'importanza di una corretta raccolta dati sul campo. Oppure analizziamo assieme ad Abraham Wald le carlinghe dei bombardieri alleati che rientrano dalle missioni della seconda guerra mondiale: in quali punti è necessario rafforzare gli aerei affinché si riduca il numero di quelli abbattuti?

Da esperienze come queste sono nate idee che oggi sono usate negli algoritmi dei giganti della *tech economy* e che in futuro, secondo gli autori, potrebbero essere ancora più centrali nello sviluppo della nostra società.

Marco Boscolo

Numeri intelligenti
di Nick Polson e James Scott
UTET, Milano, 2019,
pp. 320 (euro 28,00)

In viaggio per sopravvivere

Perché migrano alcune specie e come riescono a farlo

Il giovane Holden del romanzo di Salinger si chiedeva dove andassero d'inverno le anatre di Central Park, quando il laghetto che le ospitava si ghiacciava. Una curiosità forse oziosa, un simbolo su cui la critica si è interrogata, ma che non perde di fascino anche nel suo significato letterale. Il fatto che alcune specie animali si sobbarchino lunghi e pericolosi tragitti in specifiche stagioni ha stimolato la curiosità degli esseri umani fin dai tempi più antichi, suggerendo risposte che oggi ci fanno sorridere, ma che denotano attenzione al tema.

Secondo Aristotele, d'inverno le rondini si posavano sui canneti dei laghi e, dopo aver perso il piumaggio, si trasformavano in rane, per poi tornare rondini in primavera, con le belle ali ricoperte di nuove e lucenti piume. Un'ipotesi, per quanto incredibile e stramba, che era sembrata verosimile anche a scienziati come Linneo e Cuvier. Anche oggi che sulle migrazioni animali sappiamo molte cose in più, la domanda centrale rimane il perché di un comportamento che sembra oneroso. La risposta dell'autrice, giornalista scientifica e naturalista di formazione, è chiara: «Si viaggia [...] perché i benefici derivanti dall'arrivo a destinazione superano i costi: possiamo dire che i migratori preferiscono andare incontro a una morte probabile, per sfuggire a una morte certa». Una considerazione applicabile a molti casi che coinvolgono anche le migrazioni umane, come storia e cronaca recente testimoniano, spesso tragicamente.

Nell'illustrare gli aspetti messi in luce dalla ricerca su questa strategia estrema di sopravvivenza, l'autrice ne mette in rilievo i lati più sorprendenti, che è stato possibile appurare, per esempio, con strumenti come il GPS, ma anche con ausili tradizionali come l'inanellamento degli uccelli. Apprendiamo di straordinarie abilità di orientamento basate sulle stelle o sul campo magnetico terreste, come pure di migrazioni che coinvolgono generazioni. Ma si ha anche modo di soffermarsi sui riflessi dei cambiamenti climatici su un meccanismo delicato che l'azione umana ha contribuito a sconvolgere, con conseguenze drammatiche in prospettiva.

Anna Rita Longo

Senza confini
di Francesca Buoninconti
Codice Edizioni, Torino, 2019,
pp. 204 (euro 18,00)

La matematica senza gli umani

Un approccio insolito alla storia di questa scienza

Il rapporto tra uomo e matematica resiste ancora a ogni tentativo di definizione. Non vi è ancora certezza se la matematica sia una pura creazione dell'intelletto umano, come alcuni ritengono, o sia invece universalmente immanente, una sorta di cruciale caratteristica di questo universo che lascia a noi solo il compito di scoprirla, capirla con lenti progressi. Così, qualsiasi narrazione della matematica non può che oscillare tra due opzioni alternative: mettere al centro la matematica, unica scienza che può pienamente essere descritta con il suo proprio linguaggio evitando ogni accenno alle persone che l'hanno sviluppata, o concentrarsi su uomini e donne che vi hanno dedicato vita, opere, emozioni.

La scelta di Mickaël Launay in questo suo «romanzo» pare uno strano compromesso: l'obiettivo è dichiaratamente avvicinare alla matematica coloro che ne sono ignari o spaventati, e pertanto usa molta cura nell'evitare tecnicismi: opta allora per un «racconto» della storia della matematica con lo stile dell'affabulatore professionista; ma riserva alla matematica stessa il ruolo della viva protagonista della storia, lasciando agli esseri umani solo la parte delle comparse, necessarie per ripercorrere la storia della disciplina, ma tutto sommato non indispensabili, quasi sostituibili.

L'approccio è insolito, ma ben in linea con l'autore: abbastanza giovane da non temere di rompere con le tradizioni e abbastanza fantasioso da non lasciarsi spaventare dalle nuove tecnologie, Launay è diventato famoso per usare canali di divulgazione tutt'altro che usuali, come i video su YouTube o i «banchetti matematici» per le strade dei paesini francesi. Il risultato è un racconto che prende spunto spesso da esperienze personali in cui il lettore non faticherà a immedesimarsi e che – a volte inaspettatamente – rivelano l'onnipresenza della matematica nella vita di tutti i giorni.

E così anche il lettore esperto, pur non essendo il destinatario ideale del libro, trova originali punti di vista dell'evoluzione della matematica dalle origini fino ai giorni nostri.

Piero Fabbri

Il grande romanzo della matematica
di Mickaël Launay
La nave di Teseo, Milano, 2019, pp. 334 (euro 20,00)

All'origine del tutto

Scienza, filosofia e arte raccontano la nascita dell'universo

E luce fu. Ma ci vollero 380.000 anni dopo il big bang affinché l'universo uscisse finalmente dall'oscurità e diventasse trasparente. Oggi riusciamo a compiere una ricostruzione piuttosto accurata della sconvolgente sequenza di eventi che caratterizzò la crescita del nostro neonato universo, grazie alla sintesi di conoscenze scientifiche provenienti dalla cosmologia e dalla fisica delle particelle, di cui Guido Tonelli è uno dei più profondi conoscitori, avendo guidato al CERN uno dei grandi esperimenti che ha portato nel 2012 alla scoperta del bosone di Higgs.

Il racconto delle origini accompagna da sempre la storia degli esseri umani, molto probabilmente affonda le radici nel tempo profondo dei nostri antenati ominidi, e rimane un bisogno insopprimibile dell'animo, come testimoniamo le figure molto distanti - da un manager come Sergio Marchionne al teologo gesuita Cesare Geroldi – con le quali Tonelli si ritrova a confrontarsi, innescando la scintilla da cui è nato questo libro. Tra i diversi pregi, *Genesi* ha quello di mettere sin da subito sotto tensione la capacità immaginativa dei lettori, soprattutto occidentali, abituati ad assimilare il concetto di vuoto al nulla. Il vuoto da cui nasce l'universo è invece un sistema materiale, in cui materia ed energia sono nulle, caratterizzata da una trama sottile di fluttuazioni quantistiche, da una delle quali è partita la lunga corsa che ha portato, 13,8 miliardi di anni dopo, fino a questo momento.

E poi il libro ci regala un nuovo modo di guardare al cielo, la cui osservazione ha da sempre ispirato un senso di ordine e serenità. Il racconto di Tonelli ci fa scoprire fenomeni di incredibile violenza, come la fusione di due stelle di neutroni o la fase parossistica delle stelle morenti fino alla voracità insaziabile dei buchi neri supermassicci nei nuclei galattici attivi.

Dall'azione del campo di Higgs che richiama quella del Demiurgo di Platone alla rottura di simmetria esemplificata nella *Pala* del Giorgione, Tonelli unisce scienza, filosofia, arte per raccontarci come tutto ha avuto origine. E stimola la curiosità di saperne ancora di più.

Marco Motta

Genesi
di Guido Tonelli
Feltrinelli, Milano 2019, pp. 220 (euro 17,00)

Anthropocene
fino al 6 ottobre 2019
Fondazione MAST, via Speranza 42, Bologna
www.anthropocene.mast.org

L'Antropocene per immagini

A Bologna una mostra esplora in modo multimediale l'impatto delle attività umane

Nel 2017 il passaggio dell'uragano Harvey sul Texas ha provocato imponenti inondazioni a Houston e in tutto lo Stato. Nel circuito automobilistico di Baytown sono state raccolte temporaneamente tra le 30.000 e le 40.000 automobili danneggiate dalla tempesta: alcune erano in attesa di ritornare ai proprietari, altre di essere rivendute come ferrivecchi, altre ancora di essere demolite. È in quel frangente che il fotografo Edward Burtynsky le ha immortalate, come una sorta di monumento temporaneo alla loro presenza sulla Terra. Una presenza tuttavia capace di provocare profondi cambiamenti. La foto delle carcasse di automobili texane è solo uno dei punti di accesso alla narrativa della mostra che arriva in Italia dopo l'esordio canadese dello scorso anno, quando è stata ospitata dalla National Gallery of Canada a Ottawa.

Da diversi anni Burtynsky è interessato all'effetto delle miniere sul paesaggio, ma solo con il progetto in comune con i *filmaker* Jennifer Baichwal e Nicholas de Pencier è nato un vero e proprio percorso di ricerca estetica e «antropologica» sui cambiamenti provocati dall'attività umana. I cinque anni di indagini si sono concretizzati in una galleria fotografica, un documentario (proiettato per tutta la durata della mostra) e una serie di installazioni multimediali immersive che permettono al visitatore di «entrare» dentro alcune immagini per meglio coglierne l'essenza. Il percorso nell'Antropocene si snoda così a cavallo tra scienza e arte, con rigorose documentazioni sui fenomeni catturati e una cura estetica che permette a immagini di luoghi normalmente nascosti di diventare vere opere d'arte. Si va così dalle cave di marmo di Carrara alle miniere di metalli siberiane, passando per le raffinerie statunitensi e le attività di disboscamento nigeriane.

A colpire chi già mastica l'argomento non sono forse le informazioni, comunque presenti e puntuali, ma le dimensioni e le proporzioni dell'attività umana: escavatori alti una decina di piani, raffinerie che si perdono a vista d'occhio, l'artificiale organizzazione dei campi agricoli visti dall'alto. Le immagini, e il film, dei tre artisti canadesi hanno la forza di colpire ed emozionare il visitatore senza passare per facili sentimentalismi o romantici ecologismi. Il progetto artistico *Anthropocene* colpisce perché, per certi versi, freddamente documentativo e inquietantemente seducente.

Marco Boscolo

In alto a destra, miniera di potassio dell'azienda Uralkali a Bereznik, in Russia (2017); sotto, bacino di decantazione per il fosforo vicino a Lakeland, in Florida (2012); qui sopra, a sinistra riciclo della plastica nella discarica di Dandora, a Nairobi (2016), in Kenya; a destra, Makoko, Lagos, in Nigeria (2016).

Prossimo numero

a settembre

Il big bang della vita

di Rachel A. Wood

Nuovi fossili e l'analisi della chimica degli oceani antichi rivelano le radici sorprendentemente profonde della cosiddetta esplosione del Cambriano, all'origine degli animali complessi, che potrebbe essersi verificata milioni di anni prima di quanto si pensasse.

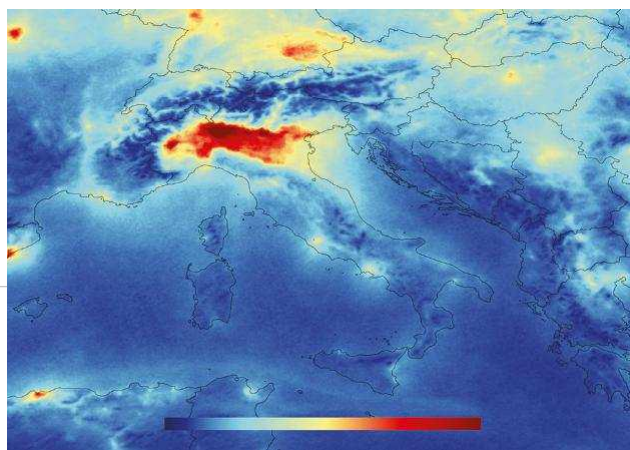
Con un occhio aperto

di Gian Gastone Mascetti

Animali come foche e delfini hanno sviluppato la singolare capacità di dormire con metà cervello, mentre l'altra metà rimane vigile. Il sonno con un solo emisfero offre una possibilità straordinaria per indagare i misteri di questo stato fondamentale per molti animali e fare chiarezza su alcuni disturbi del sonno nell'uomo.

La più inquinata d'Europa

di Cristina Da Rold

Tra particolati, ossidi di azoto e ozono, la Pianura Padana è la regione più inquinata d'Europa, anche a causa delle particolari condizioni morfologiche e climatiche. Un'inchiesta sulle ricadute per la salute dei cittadini e sui piani per migliorare la qualità dell'aria.

LE SCIENZE S.p.A.

Sede legale: Via Cristoforo Colombo 90, 00147 ROMA.

Redazione: tel. 06 49823181
Via Cristoforo Colombo 90, 00147 Roma
e-mail: redazione@lescienze.it
www.lescienze.it

Direttore responsabile
Marco Cattaneo

Redazione
Claudia Di Giorgio (*caporedattore*), Giovanna Salvini (*caposervizio grafico*), Andrea Mattone (*grafico*), Cinzia Sgheri, Giovanni Spataro

Collaborazione redazionale
Folco Claudi, Gianbruno Guerrerio
Segreteria di redazione:
Andrea Lignani Marchesani
Progetto grafico: Giovanna Salvini

Referente per la pubblicità
A. Manzoni & C. S.p.A.
agente Daria Orsi (tel. 02 57494475, 345 4415852)
e-mail dorsi@manzoni.it

Pubblicità:
A. Manzoni & C. S.p.A.
Via Nervesa 21, 20139, Milano,
telefono: (02) 574941

Stampa
Puntoweb, Via Variante di Cancelliera, snc, 00040 Ariccia (RM).

Consiglio di amministrazione
Corrado Corradi (presidente), Michael Keith Florek (vice presidente), Gabriele Acquistapace, Markus Bossle, Stefano Mignanego

Responsabile del trattamento dati (D. lgs. 30 giugno 2003 n.196):
Marco Cattaneo

Registrazione del Tribunale di Milano n. 48/70 del 5 febbraio 1970.

Rivista mensile, pubblicata da Le Scienze S.p.A.
Printed in Italy - luglio 2019

ISSN 2499-0590

SCIENTIFIC AMERICAN

Editor in Chief and Senior Vice President
Mariette DiChristina

President
Dean Sanderson

Executive Vice President
Michael Florek

Hanno collaborato a questo numero
Per le traduzioni: Francesca Bernardis: *Immaginazione artificiale*, *Dengue e disastri*; Daniele Gewurz: *Nelle profondità dell'atomo*; Lorenzo Lilli: *Visioni notturne*; Giulio Mazzolo: *Oltre gli argini*; Alfredo Tutino: *Meccanismi dell'aggressività umana*.

ABBONAMENTI E ARRETRATI
GEDI Distribuzione S.p.A.

Per informazioni sulla sottoscrizione di abbonamenti e sulla richiesta di arretrati telefonare al numero 0864.256266 o scrivere a abbonamenti@gedidistribuzione.it o arretrati@gedidistribuzione.it
Fax 02.26681986.

Italia	
abb. annuale	€ 39,00
abb. biennale	€ 75,00
abb. triennale	€ 99,00
copia arretrata	€ 9,00
Estero	
abb. annuale Europa	€ 52,00
abb annuale Resto del Mondo	€ 79,00

Accertamento diffusione stampa certificato n. 8593 del 18/12/2018

ESA/Rosetta/Copernicus Sentinel data (2019) – CC BY-SA IGO 3.0 (*Pianura padana*); Franz Anthony (*illustrazione*)